

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный университет
имени М.В.Ломоносова»**

На правах рукописи



Шматков Алексей Алексеевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ТРЕХМЕРНЫХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ
НАБЛЮДЕНИЙ НА МЕЛКОВОДНЫХ АКВАТОРИЯХ**

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
Гайнанов Валерий Гарифьянович

Москва – 2016

Оглавление

Введение.....	5
Глава 1. Современная практика и особенности проведения инженерно-геологических изысканий на мелководных акваториях.....	10
1.1. Цели и задачи инженерно-геологических изысканий.....	11
Опасные инженерно-геологические процессы и явления.....	12
1.2. Современная практика проведения инженерно-геологических изысканий.....	16
1.3. Эффективность трехмерных сейсмических методов в составе инженерно-геологических изысканий.....	19
1.4. Требования к методике трехмерных сейсмоакустических наблюдений в составе инженерно-геологических изысканий.....	22
Вертикальная и горизонтальная разрешающая способность.....	25
Размер бина и кратность наблюдений.....	29
Требования к геометрии системы наблюдений.....	34
Минимальное и максимальное удаление, азимутальные характеристики.....	36
1.5. Выводы к главе 1.....	40
Глава 2. Анализ возможностей существующих методик трехмерных сейсмоакустических наблюдений при проведении инженерно-геофизических исследований на мелководных акваториях.....	41
2.1. Классификация приемоизлучающих систем для трехмерных сейсмоакустических наблюдений.....	43
2.2. Анализ систем с фиксированным приемоизлучающим массивом.....	45
Система “3D Chirp”.....	45
Система “Sub-Bottom Imager”.....	46
Система компании Innomar.....	48
Система “SEAMAP-3D”.....	49
Система “Kite”.....	50
Система “SEISCAT”.....	51
Система “Opus3D”.....	52
2.3. Анализ систем, буксируемых на выстрелах.....	53
Системы “HR3D” и “VHR3D”.....	53
Система университета Лозанны.....	55
2.4. Анализ систем, буксируемых при помощи параванов.....	57
Системы на основе оборудования для проведения разведочной 3Д сейморазведки....	57
Система “P-Cable 3D”.....	58

2.5.	Сравнительная характеристика приемоизлучающих систем	60
2.6.	Эксперименты МГУ имени М.В.Ломоносова в Кандалакшском заливе	61
2.7.	Выводы к главе 2	64
Глава 3.	Новая методика трехмерных сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях.....	65
3.1.	Описание способа буксировки приемоизлучающего массива	65
3.2.	Технические требования к приемоизлучающей системе	67
	Требования к многоканальным сейсмическим косам и регистрирующей системе	67
	Требования к источнику упругих колебаний	70
	Выбор глубины буксировки источников и приемников.....	73
3.3.	Навигационное обеспечение трехмерной сейсмоакустической съемки	74
3.4.	Рекомендации по выбору сети наблюдений	77
3.5.	Расчет параметров разработанной методики трехмерных сейсмоакустических наблюдений	78
	Анализ конфигураций приемоизлучающего массива с одним источником упругих колебаний	81
	Анализ конфигураций приемоизлучающего массива с двумя источниками упругих колебаний	85
3.6.	Анализ экономических показателей разработанной методики	87
3.7.	Преимущества и ограничения разработанной методики.....	89
3.8.	Практическая реализация разработанной методики и опытно-методические работы в акватории Белого моря.....	91
3.9.	Выводы к главе 3	97
Глава 4.	Разработка усовершенствованного графа обработки данных трехмерных сейсмоакустических наблюдений.....	98
4.1.	Особенности обработки данных трехмерных сейсмоакустических наблюдений	98
	Контроль качества присвоения геометрии наблюдений и коррекция удалений	99
	Учет искажения формы импульса при вводе кинематических поправок	99
	Ввод статических поправок	99
	Подавление волн-спутников.....	100
4.2.	Граф обработки данных высокоразрешающей трехмерной сейсморазведки на примере съемки во фьорде Люнген (Норвежское море).....	101
	Геологическая характеристика района исследований	102
	Наборный контроль качества данных и предварительная обработка	102
	Ввод статических поправок за приливно-отливные течения	103

Бинирование.....	104
Регуляризация амплитуд.....	105
Скоростной анализ	106
Результаты построения сейсмического изображения геологической среды.....	106
4.3. Граф обработки данных трехмерных сейсмоакустических наблюдений на примере съемки в губе Ругозерская (Белое море)	109
Геологическая характеристика района исследований	109
Предварительная обработка и контроль качества исходных данных	110
Анализ шумов буксировки	112
Расчет и контроль качества геометрии наблюдений, коррекция удалений.....	114
Бинирование и анализ карт кратности.....	115
Компенсация амплитудно-частотных эффектов, вызванных волнением моря.....	116
Учет статических поправок	119
Анализ полученного сейсмического изображения геологической среды	121
4.4. Выводы к главе 4	125
Заключение	126
Список литературы	128
Список иллюстраций	138
Приложение А. Сеть профилей геофизической съемки на площадке для установки буровой платформы	143
Приложение Б. Сравнение ширины покрытия методик трехмерных сейсмоакустических наблюдений.....	144
Приложение В. Текст программы для расчета параметров разработанной методики трехмерных сейсмоакустических наблюдений.....	145
Приложение Г. Сводная таблица профилей сейсмоакустической съемки в губе Ругозерская ..	149

Введение

Актуальность темы

В последние годы началось активное освоение шельфа арктических морей. В первую очередь это связано с открытием новых нефтегазовых месторождений, разработка любого из которых неизбежно влечет за собой проектирование, строительство и эксплуатацию большого количества гидротехнических сооружений. Необходимым этапом является проведение комплекса инженерно-геологических изысканий, по результатам которых принимаются соответствующие технические решения. Помимо этого, получаемые данные необходимы для картирования геологических объектов, которые могут представлять опасность для инженерных сооружений и оказывать влияние на окружающую среду.

Одним из стандартных методов, используемых при проведении инженерно-геологических изысканий, является одно- и многоканальное сейсмоакустическое профилирование, позволяющее с высокой детальностью изучать верхнюю часть геологического разреза. Исследования проводятся с применением различных типов источников, возбуждающих упругие колебания в широкой полосе частот. Благодаря развитию профильных (2Д) наблюдений произошло существенное увеличение получаемой информации о сейсмогеологических характеристиках среды. В то же время относительно редкая пространственная сеть наблюдений, используемая при проведении подобных изысканий, не позволяет в полной мере изучить строение и свойства геологической среды. Низкая пространственная разрешающая способность профильных наблюдений зачастую бывает недостаточна для картирования зон распространения опасных инженерно-геологических явлений и процессов в плане, особенно в условиях сложнопостроенных сред. Логичным развитием сейсмоакустических технологий должно стать использование трехмерных наблюдений, поскольку они дают более широкие возможности для изучения строения верхней части донных отложений и оценки геологических рисков.

Несмотря на то, что развитие и применение морской трехмерной сейсморазведки началось еще в 70-х годах XX века, она получила широкое распространение только при поисках углеводородов. Стоимость проведения полевых работ при этом остается достаточно высокой, но получаемые данные позволяют значительно снизить издержки при последующей эксплуатации месторождения. Поэтому на данный момент трехмерная сейсморазведка стала одним из обязательных этапов геологоразведки. Высокочастотная переобработка данных разведочной 3Д сейсморазведки позволяет использовать их для решения инженерно-геологических задач, однако их пространственная и временная разрешающая способность остается достаточно низкой.

Первые методики трехмерных сейсмоакустических наблюдений появились лишь в начале 90-х годов XX века и в настоящее время практически не применяются при проведении инженерно-геологических изысканий. По мнению некоторых авторов [Missiaen, 2005; Games,

2012] развитие методик трехмерных сейсмоакустических наблюдений для решения инженерно-геологических задач ограничивается в силу нескольких факторов:

1. Технологических – затруднительно изменить масштаб разведочной трехмерной приемоизлучающей системы и адаптировать ее для работы на мелководных акваториях;
2. Экономических – необходимость проведения дополнительных исследований в рамках стандартного комплекса приводит к увеличению себестоимости работ и уменьшению прибыли, что в свою очередь требует большего финансирования от заказчика;
3. Временных – инженерно-геологические проекты ограничены по времени выполнения и наличие дополнительного метода в программе работ увеличивает издержки как на этапе полевых работ, так и при последующей обработке и интерпретации.

Вышеперечисленные факторы приводят к тому, что разработка и применение методик трехмерных сейсмоакустических наблюдений во многих случаях ограничивается научными исследованиями. Лишь единичные приемоизлучающие системы активно используются для решения практических задач в рамках инженерно-геологических изысканий. В то же время существует широкий круг задач, связанных с изучением верхней части донных отложений и картированием опасных объектов, решить которые возможно только на основе данных трехмерных сейсмоакустических наблюдений. К ним можно отнести, например, картирование валунов в верхней части разреза, детальное изучение линз приповерхностного газа и водонасыщенных осадков, прослеживание разрывных нарушений в объеме, мониторинг быстропротекающих геологических процессов и так далее.

Автором предложена и реализована на практике новая методика трехмерных сейсмоакустических наблюдений, нацеленная на решение широкого спектра задач на мелководных акваториях с глубинами воды до первых десятков метров. Приемоизлучающая система может быть легко адаптирована к условиям съемки, при этом экономическая эффективность достигается за счет использования стандартного набора оборудования и относительно высокой скорости проведения полевых работ.

Обработка данных трехмерных сейсмоакустических наблюдений обладает рядом особенностей, что в первую очередь связано с масштабом измерений и длиной волны сигнала, поэтому требуется применение специализированных графов и процедур обработки. Предложенный в работе граф цифровой обработки нацелен на улучшение прослеживаемости отражающих горизонтов в верхней части разреза и повышение отношения сигнал/шум сейсмического куба.

Цель работы

Целью работы является разработка методики трехмерных сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях для получения детального сейсмического изображения верхней

части донных отложений и изучения опасных инженерно-геологических явлений и процессов, а также картирования зон их распространения.

Основные задачи исследований

Исследование современных представлений о трехмерных сейсмических и сейсмоакустических методах изучения геологической среды, анализ технических требований к аппаратуре и методикам наблюдений, изучение особенностей цифровой обработки трехмерных сейсмических данных.

Обзор современных технических решений для проведения трехмерных сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях, анализ их достоинств и недостатков.

Теоретическое обоснование новой методики для проведения трехмерных сейсмоакустических съемок с целью решения инженерно-геологических задач и картирования потенциально опасных геологических объектов в верхней части донных отложений на мелководных акваториях.

Техническая реализация и практическое опробование предложенной методики.

Разработка специализированного графа цифровой обработки данных трехмерных сейсмоакустических наблюдений и его апробация на данных высокоразрешающих сейсмических и сейсмоакустических наблюдений, полученных в акватории Белого и Норвежского морей.

Основные защищаемые положения

Предложенная последовательность выбора основных параметров приемоизлучающего массива позволяет рассчитать систему наблюдений с учетом заданных параметров геологической среды и особенностями проведения сейсмоакустических работ на мелководных акваториях.

Разработанная методика наблюдений позволяет получать детальные трехмерные сейсмоакустические данные о строении верхней части донных отложений на мелководных участках акватории при оптимальных временных и финансовых затратах.

Специализированный граф обработки учитывает особенности получения трехмерных сейсмоакустических данных и позволяет построить объемное сейсмическое изображение донных отложений с высокой разрешающей способностью.

Научная новизна

На основании теоретических и экспериментальных исследований, а также обобщения литературных данных, сформулированы требования к методике сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях, позволяющей получать трехмерное сейсмическое изображение верхней части геологической среды.

Предложена и практически реализована новая методика трехмерных сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях для решения различных задач при проведении инженерно-геологических изысканий.

Разработан граф цифровой обработки данных, позволяющий преодолеть специфические проблемы, возникающие при обработке результатов трехмерных сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях.

Практическая значимость

Разработанная методика трехмерных сейсмоакустических наблюдений под руководством автора была апробирована на акватории Белого моря. Собранные при этом полевые материалы были обработаны автором по специальному графу обработки трехмерных сейсмоакустических данных. В результате был построен сейсмический куб размером 750×60 метров с разрешением 0.5 метра, что дает возможность более детально изучить геологических процессы, протекающие в губе Ругозерская Кандалакшского залива Белого моря.

Граф цифровой обработки был апробирован на данных трехмерных сейсмических наблюдений высокого разрешения в акватории Норвежского моря и сейсмоакустической съемки в акватории Белого моря. Предложенные подходы к цифровой обработке сейсмоакустических данных могут применяться при выполнении различных научных и производственных проектов.

Разработанная методика трехмерных сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях может быть использована для изучения верхней части донных отложений в прибрежной части континентального шельфа и других мелководных акваториях, при проведении инженерно-геологических изысканий, а также может найти применение при проведении археологических исследований, комплексного изучения подводных ландшафтов и экологических изысканий.

Степень достоверности результатов

Результаты, включенные в диссертационную работу, получены на основании исследований, проведенных на высоком научном и техническом уровне с применением современной аппаратуры, технических и программных средств. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные автором, обоснованы теоретически и подтверждены в процессе проведения полевых наблюдений, хорошо согласуются с существующими представлениями о геологическом строении изучаемых территорий и потому не вызывают сомнений.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 1 статья в электронном научном издании и 5 тезисов докладов на конференциях.

Апробация работы

Основные положения диссертации докладывались на следующих конференциях: Российская техническая нефтегазовая конференция и выставка SPE по разведке и добыче, Москва, 2012 г.; 10^я международная конференция и выставка «Инженерная геофизика», EAGE, Геленджик, 2014 г.; III Международная научно-практическая конференция «Морские исследования и образования», Москва, 2014; Научно-практическая конференция «Гальперинские чтения-2014», Москва, 2014; Сейсмические технологии, Москва, 2015.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, содержит 149 страниц текста, включая 100 рисунков, список литературы из 137 наименований и 4 приложения.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю – д.т.н. В.Г. Гайнанову – за помощь в подготовке диссертации, ценные советы и консультации. Автор благодарен М.Ю. Токареву за всестороннюю помощь и обеспечение проведения полевых экспериментов. Автор выражает благодарность всему коллективу кафедры сейсмометрии и геоакустики Геологического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова за знания, полученные в период обучения, а также д.ф.-м.н. М.Л. Владову и к.г.-м.н. Н.В. Шалаевой за критические замечания и конструктивную критику. Автор признателен коллективу «Центра анализа сейсмических данных МГУ имени М.В. Ломоносова» за консультации и моральную поддержку. Автор выражает глубокую благодарность коллективу Marine Geo Service и особенно А.Г. Шматкову за помощь в реализации технических решений, проведении полевого эксперимента и оказании финансовой поддержки. Автор благодарит коллектив ББС МГУ, особенно д.б.н. А.Б. Цетлина и А.С. Козлова, за помощь при проведении полевых работ на борту НИС «Студент». Автор выражает признательность Н. Duarte за ценные советы по проведению полевых наблюдений. Автор благодарит за помощь в подготовке диссертации и моральную поддержку к.ф.-м.н. А.А. Бочарову, А.А. Верхняцкого, В.В. Иванову, Е.А. Козьмину, к.б.н. А.И. Исаченко, А.К. Потемку, д.г.-м.н. А.Е. Рыбалко, Я.Е. Терехину, А.М. Токарева, Е.Л. Щербакову. Автор благодарит коллективы компаний «Деко-геофизика СК» и «Сеймотек» за предоставленную возможность использовать программное обеспечение и помощь при обработке данных.

Автор благодарит свою супругу А.А. Шматкову за помощь в обработке данных и бесконечное терпение на протяжении всего времени подготовки диссертации. Также автор признателен своим родителям, родственникам и друзьям за моральную поддержку и всестороннюю помощь, без которой эта работа не была бы завершена.

Работа выполнена с использованием оборудования, приобретенного за счет Программы развития Московского университета.

Глава 1. Современная практика и особенности проведения инженерно-геологических изысканий на мелководных акваториях

Мелководные обстановки являются наиболее динамичными среди прочих типов прибрежных зон. Быстрое осадконакопление и активный перенос отложений, скопления приповерхностного газа и другие опасные геологические процессы и явления требуют всестороннего изучения при ведении любой хозяйственной деятельности [Missiaen, 2005; OGP, 2009; OGP, 2011].

В настоящее время проблема изучения верхней части геологического разреза на шельфе особенно актуальна в связи с поиском и разведкой месторождений углеводородов в российском секторе Арктики, поскольку установка буровых платформ и строительство различных гидротехнических сооружений требует проведения соответствующего комплекса инженерно-геологических изысканий, включающих геофизические, геотехнические и другие виды исследований. Так, например, более половины площади лицензионных участков ОАО «НК «Роснефть» в этом регионе расположены на акваториях с глубиной воды менее 50 метров (Рис. 1.1) в зоне распространения многолетнемерзлых пород и мелкозалегающих газонасыщенных отложений, что затрудняет проведение исследований с использованием стандартных методик и подходов.

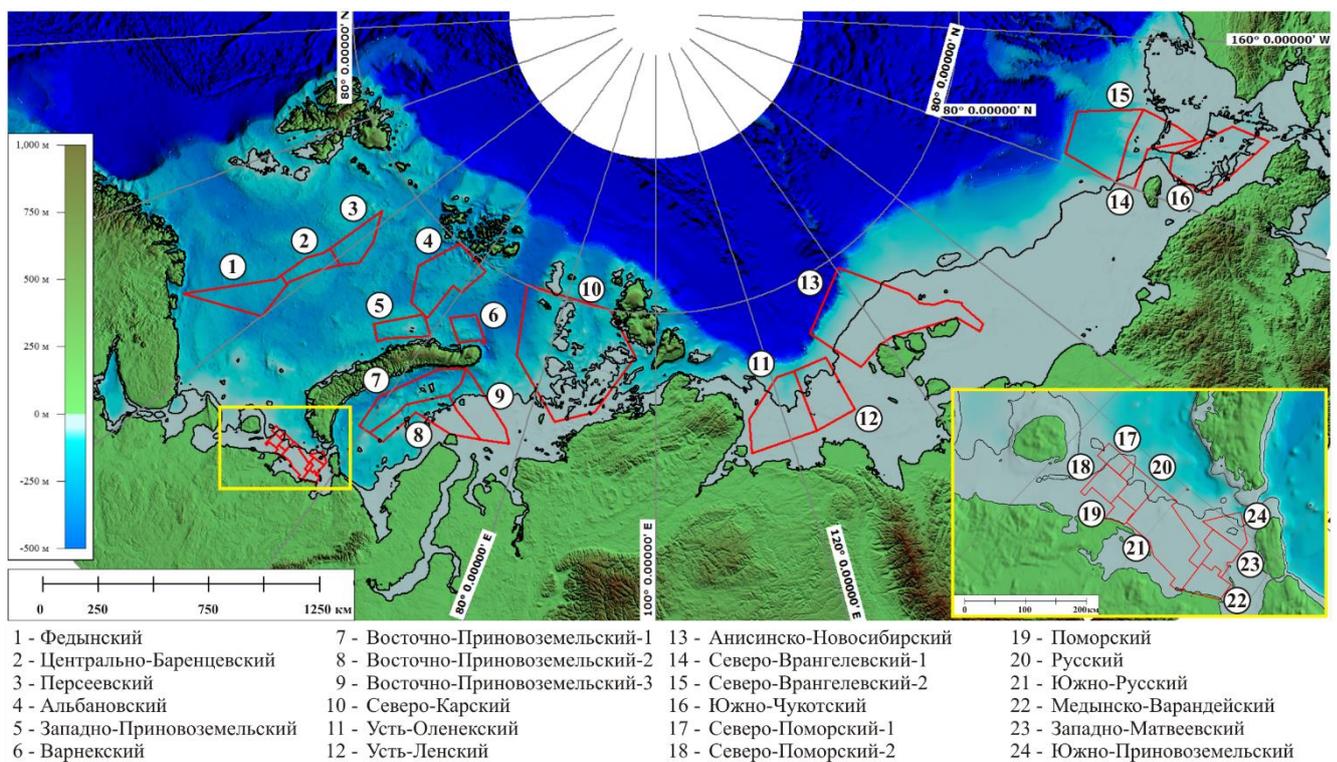


Рис. 1.1: Схема расположения лицензионных участков ОАО «НК «Роснефть» на арктическом шельфе Российской Федерации. Черным цветом отмечена изобата 50 метров

1.1. Цели и задачи инженерно-геологических изысканий

Инженерно-геологические изыскания выполняются для изучения инженерно-геологических условий района строительства гидротехнических сооружений, минимизации возможного ущерба для персонала и оборудования, а также для защиты окружающей среды от возможных последствий. Изыскания должны обеспечивать комплексное изучение инженерно-геологических условий района, включая рельеф, геологическое строение, сеймотектонические, геоморфологические, гидрогеологические и геокриологические условия, состав, состояние, свойства и температуру грунтов, с целью получения необходимых материалов для обоснования предпроектной и проектной документации на строительство гидротехнических объектов и мероприятий инженерной защиты [СП 11-114-2004; Dyer, 2011; OGP, 2011]. Одной из важнейших целей проведения морских инженерно-геологических изысканий является идентификация всех возможных условий и потенциальных опасностей, обусловленных техногенными, природными и геологическими объектами, которые могут оказать влияние на надежность гидротехнических сооружений и причинить вред окружающей среде при осуществлении хозяйственной деятельности [Kvalstad, 2007; OGP, 2011; Calarco et al., 2014].

Выбор комплекса методов и решаемые задачи определяются конечной целью инженерно-геологических изысканий. В случае проведения изысканий на площадке для бурения основное внимание уделяется оценке инженерно-геологических опасностей вдоль планируемого ствола скважины (до глубины порядка 1 км) и прочностных свойств в местах установки опор (до глубины порядка 150 м) самоподъемной буровой установки (СПБУ) или якорей, в случае полупогружной буровой установки (ППБУ) и бурового судна [Dier et al., 2004; OGP, 2011; C-NLOPB, 2012]. Поскольку якоря оказывают меньшее воздействие на грунт и погружаются на меньшую глубину, то глубинность изысканий может быть существенно ниже (порядка 15-30 м).

При изысканиях трасс трубопроводов и других линейных объектов, а также легких гидротехнических сооружений, в первую очередь важна информация об опасных инженерно-геологических явлениях и процессах на поверхности морского дна и в верхней части донных отложений до глубины порядка 15 м. Следует отметить, что в этом случае также становится важна задача выделения мелкомасштабных объектов, которые могут не учитываться при строительстве или бурении [Wood, Hamilton, 2002; Kvalstad, 2007; Dyer, 2011].

Геофизические методы, входящие в состав инженерно-геологических изысканий, в свою очередь, должны решать две основные задачи:

- Получение данных для корреляции инженерно-геологических свойств между точками опробования (бурения, отбора проб, статического зондирования);
- Выделение локальных объектов и аномалий, обнаружение которых прямыми инженерно-геологическими методами затруднительно или невозможно.

Опасные инженерно-геологические процессы и явления

Вопросы, связанные с опасными инженерно-геологическими процессами и явлениями, хорошо описаны в литературе [Рокос и др., 2001; Wood, Hamilton, 2002; Козлов, 2005; Kvalstad, 2007; Judd, Novland, 2009; Chiocci et al., 2011; Dyer, 2011]. По характеру, свойствам и месту проявления их можно разделить на техногенные, донные природного происхождения и поддонные [OGR, 2011]. Сводная таблица представлена ниже (Таблица 1).

Таблица 1: Опасные объекты, инженерно-геологические явления и процессы [по OGR, 2011]

Объекты, техногенного происхождения	Объекты природного происхождения на дне	Поддонные объекты
Платформы: активные или законсервированные	Топография морского дна и рельеф	Скопления приповерхностного газа
Трубопроводы поверхностного и приповерхностного заложения	Газовые воронки и покмарки, донные каналы и каверны	Подземные заполненные каналы
Силовые и кабельные линии	Диапировые структуры	Осадочные толщи
Различный мусор	Сбросовые уступы	Газовые «трубы»
Устья скважин и заброшенные точки бурения	Оползневые тела, нестабильные склоны	Стратиграфические несогласия
Манифольды и опорные плиты для бурения	Песчаные банки, волны и мега-рябь	Зоны с аномально высоким поровым давлением
Оконечные части трубопроводов, клапаны и защитные рамы, манифольды	Грязевые потоки, вымоины, вулканы, скопления, впадины,	Зоны распространения газовых гидратов и водонасыщенных слоев
Места кораблекрушений	Плотные грунты	Зоны притока мелких вод
Отвалы горных пород	Области разгрузки флюида	Разломы
Материалы для защиты от размыва	Изменчивость свойств донных отложений	Эрозионные поверхности
Отпечатки опор полупогружных буровых установок	Выходы скальных пород, остроконечные скалы и валуны	Засыпанные оползни и комплексы массового переноса
Навигационные буи, ветряные двигатели и т.д.	Хемосинтетические сообщества	Соляные или грязевые диапиры и диатремы
Свалки боеприпасов и химических отходов	Россыпи газовых гидратов	Валунный слой
Археологические объекты	Рифообразующие кораллы	Многолетнемерзлые грунты

Рассмотрим подробнее опасные инженерно-геологические объекты, явления и процессы (Рис. 1.2), представляющие наибольшую опасность для гидротехнических сооружений на мелководных акваториях и изучаемые с использованием сейсмических методов.

Наибольшую опасность при бурении и другом воздействии на грунт представляют скопления свободного газа, который может находиться в различных агрегатных состояниях, а при его миграции образуются разнообразные формы донного рельефа и происходит изменение структуры донных отложений.

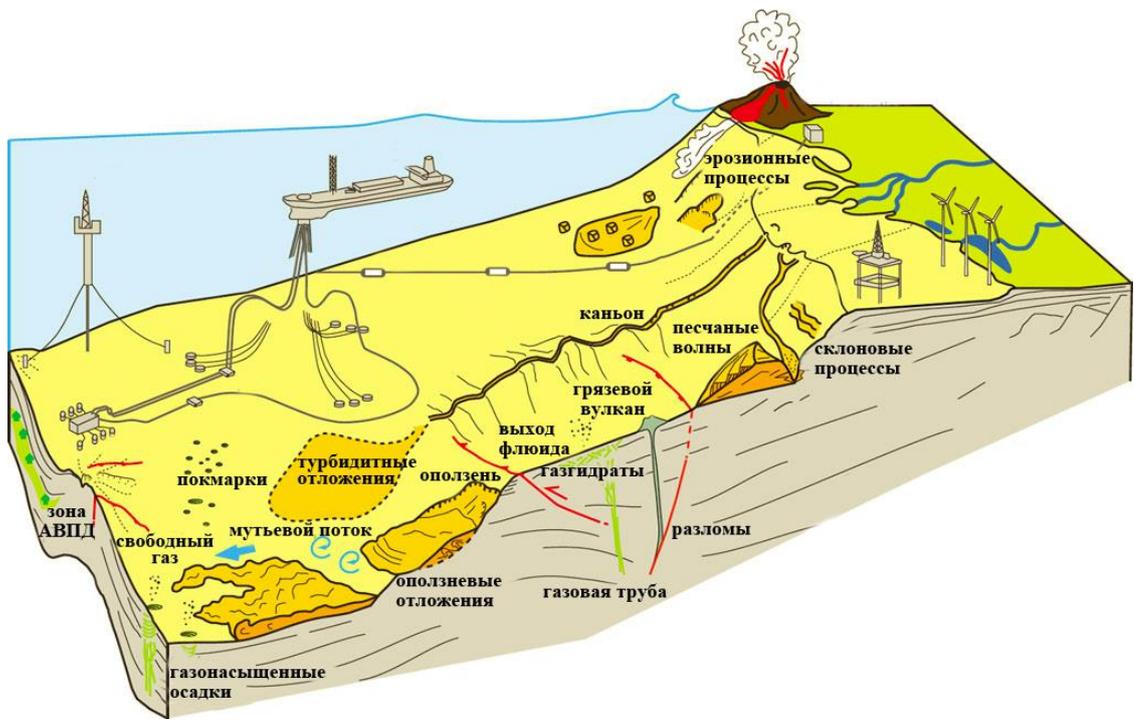


Рис. 1.2: Опасные инженерно-геологические процессы и явления [по Chiocci et al., 2011]

Скопления приповерхностного газа, который обычно локализован в так называемых *карманах*, образующихся при наличии непроницаемых покрышек, находятся в массиве горных пород под аномально высоким поровым давлением, что может привести к неконтролируемому выбросу при нарушении покрышки в процессе бурения. Это может нанести серьезный ущерб технике и персоналу, особенно если не применяются соответствующие меры [Games, 2012], поскольку газ взрывоопасен, негативно влияет на плавучесть судов и платформ, и его трудно контролировать [Judd, Hovland, 2007]. Согласно статистике [Lundqvist, 2012] за 1986-2009 годы большинство инцидентов при проведении буровых работ на шельфе Северного моря постоянно происходили в двух случаях – газовые карманы не были обнаружены в результате изысканий, либо результаты интерпретации были ошибочны. В то же время при обнаружения скоплений газа на стадии изысканий и последующего изменения местоположения скважины и принятия соответствующих мер противодействия нештатных ситуаций зафиксировано не было.

Присутствие в геологическом разрезе приповерхностного газа и недостаточность информации о его распространении приводят к авариям и осложняют бурение как разведочных и поисково-оценочных скважин, так и скважин небольшой глубины. Например, выход свободного газа при бурении инженерно-геологической скважины судном «Бавенит» в Печорском море едва не привел к его затоплению [Козлов, 2005]. Примеры аварий при неконтролируемом выходе газа на поверхность представлены, например, в книге [Judd, Hovland, 2007], при этом отмечается необходимость совместной интерпретации разведочных трехмерных сейсмических данных и результатов стандартного комплекса инженерно-геологических изысканий.

Флюиды, содержащиеся в верхней части донных отложений могут приводить к различным проявлениям так называемых *мелководных потоков*, обусловленных аномально высоким поровым давлением. Миграция и выход флюида на поверхность проявляется в разнообразных формах рельефа и особенностях геологического строения. Наиболее распространенными из них являются грязевые вулканы и покмарки (донные воронки).

Покмарки образуются, вероятнее всего, в процессе выхода свободного газа на поверхность морского дна. Диаметр покмарок в различных регионах может быть от 0.25 - 5 м до 150 м, а глубина – до первых десятков метров. Они также могут быть погребены под слоем более молодых отложений, что делает невозможным их обнаружение на данных гидролокации бокового обзора и батиметрической съемки [Judd, Novland, 2007]. Отмечается, что на арктических шельфах России поля газосодержащих осадков могут способствовать развитию воронок глубиной 2-8 м, которые формируются неожиданно и проявляются катастрофически для гидротехнических объектов [Козлов, 2005]. Помимо этого покмарки могут быть источником активного газопроявления в водной толще. Приуроченные к ним мелководные потоки в геологическом разрезе будут проявляться как так называемые *газовые трубы*. В связи с небольшими размерами их изучение необходимо проводить с использованием трехмерных методов [Judd, Novland, 2007].

Газовые гидраты, представляющих собой скопления газа связанного на молекулярном уровне с водой [Judd, Novland, 2007], являются осложняющим фактором при бурении, поскольку могут приводить к неконтролируемому выбросу газа. Зона стабильности газогидратов в условиях холодных арктических морей находится на относительно небольшой глубине, и в том числе они могут находиться в форме скоплений на дне. К областям их распространения зачастую приурочены скопления свободного газа, поэтому требуется их всестороннее изучение.

Высокое газосодержание в верхней части донных отложений способствует *разжижению* песчаных и супесчаных грунтов и переходу их в *плывающее состояние*, что резко снижает прочностные свойства грунтов основания. Вследствие этого песчаные и супесчаные газонасыщенные толщи донных отложений не могут рассматриваться в качестве надежного основания для любых гидротехнических сооружений [Козлов, 2005]. Рассмотренные в книге [Judd, Novland, 2007] примеры показывают, что газонасыщенные осадки также могут приводить к развитию склоновых процессов. Так, например, на шельфах России наблюдаются обширные зоны с локальными, с различной частотой встречаемости, проявлениями *гравитационных* и *склоновых процессов* [Козлов, 2005; Ионов, 2012]. В работе [Ионов, 2012] приведена подробная классификация этих опасных инженерно-геологических процессов. Обвалы, оползни и гравитационные потоки могут формироваться при угле наклона поверхности дна более 0.5° [Judd,

Novland, 2007] и представляют наибольшую угрозу различным линейным сооружениям. Акватории с высокой скоростью осадконакопления при этом являются зоной особого риска.

Разломы и выходы коренных пород требуют детального изучения в связи с резким изменением прочностных свойств грунтов и вероятностью нанесения различного ущерба при строительстве гидротехнических сооружений, особенно если они продолжают проявлять активность и к ним приурочены скопления свободного газа.

Грязевые вулканы и диапирсы являются одними из наиболее динамичных и нестабильных осадочных структур. Они представляют собой положительные формы рельефа, сформированные различными осадочными породами, постоянно или периодически извергающие жидкую грязь, включая воду и различные углеводороды. Диаметр может варьироваться от первых сантиметров до первых километров, а высота может достигать десятков и сотен метров [Judd, Novland, 2007].

В прибрежной зоне арктических морей отмечается наличие маломощного (до первых метров) слоя подвижных песчаных (супесчаных) отложений, которые подвержены активному воздействию гидродинамических процессов, что приводит к изменению рельефа дна во время штормов. Характерными формами донного рельефа при этом являются **песчаные волны** (высотой до 10 метров) и **мегарябь** (высотой до первых метров), что может приводить к таким инженерным проблемам, как размыв грунта вокруг оснований платформ и изменение уровня засыпки трасс трубопроводов [Козлов, 2005; OGP, 2011].

Важной особенностью верхней части донных отложений мелководных районов арктических морей, омывающих Россию, является наличие в них **субаквальных многолетнемерзлых пород (СММП)**. Мерзлые льдистые грунты распространены неравномерно по площади акватории, имеют островной характер и наиболее часто встречаются на глубинах моря менее 20 м. При этом мощность мерзлой толщи, по мере увеличения глубины моря, сокращается [Рокос и др., 2001]. В тоже время достоверные границы распространения и условия залегания СММП до сих пор не установлены ввиду отсутствия прямой геологической информации [Рекант, Васильев, 2011]. Опыт проведения инженерных изысканий на шельфе Печорского и Карского морей показал, что даже в пределах площадки изысканий СММП могут иметь ограниченное распространение, вследствие чего их корреляция по сети профильных наблюдений может быть недостаточна для достоверного прогноза свойств верхней части разреза.

К числу опасных для гидротехнических сооружений мерзлотных процессов, распространенных преимущественно в мелководных зонах арктических морей, относится **термокарст**. Образующиеся за его счет депрессии в поверхности дна имеют довольно широкое распространение и нередко заполняются осадками в случае активной литодинамики. Термокарстовые процессы также могут способствовать образованию подводных

гидролакколитов, высотой 3-15 м, протяженностью от 120-150 м до 1 км при ширине 50-350 м [Козлов, 2005].

В случае изысканий для строительства трубопроводов, в отличие от других гидротехнических сооружений, к опасным инженерно-геологическим явлениям необходимо относить отдельные *валуны*, размером более 10 см, поскольку они могут привести к повреждению трубы или инструмента трубоукладочной баржи. Часто их скопления встречаются на дне палеорусел или среди моренных отложений [Dyer, 2011; OGP, 2011]. На сейсмической записи отдельные валуны будут представлены дифракциями, поэтому при обработке данных следует с осторожностью применять процедуры, подавляющие их, и при проведении интерпретации анализировать также и временные разрезы до миграции.

Палеоруслы и каналы, в том числе *следы ледникового выпахивания*, заполненные более молодыми осадками, могут быть шириной от первых десятков сантиметров до десятков километров [Ласточкин, 1984; OGP, 2011] и также представляют опасность в связи с изменчивостью прочностных свойств грунтов в пространстве.

Наиболее опасными техногенными объектами являются *неразорвавшиеся боеприпасы* (*eng. UXO, unexploded ordnance*) и *контейнеры с химическим оружием*. Их размер может варьировать от первых десятков сантиметров до первых метров и они могут быть обнаружены сейсмоакустическими методами при достаточно плотной сети наблюдений [Missiaen et al., 2010] или использовании трехмерных сейсмоакустических систем [Morrow et al., 2015].

1.2. Современная практика проведения инженерно-геологических изысканий

Проведение морских инженерно-геологических изысканий регламентируется различными нормативными документами [British Standard 5930, 1999; OSIG, 2000; СП 11-114-2004; OSIG, 2004; СТО Газпром 2-3.7-050-2006; OGP, 2011; СП 47.13330.2012; OSIG, 2014]. В зависимости от поставленных целей и задач они могут включать в себя большой комплекс различных геофизических, геологических, экологических и гидрометеорологических исследований.

Основными методами инженерно-геологических изысканий на шельфе являются *бурение* и *отбор проб грунта* пробоотборниками и грунтоносами различных типов с последующими лабораторными исследованиями [СП 11-114-2004]. *Статическое зондирование* (СРТ) в различных модификациях позволяет определять инженерно-геологические свойства грунтов *in-situ*, однако его применение в России в настоящее время не регламентируется нормативными документами и вследствие этого ограничено.

Батиметрическая съемка позволяет получить информацию о характере рельефа морского дна. В случае использования многолучевого эхолота на этом этапе проведения изысканий могут быть также обнаружены мелкомасштабные особенности на морском дне. В совокупности с

данными *гидролокатора бокового обзора* это дает возможность идентифицировать опасные инженерно-геологические явления, приуроченные к поверхности дна (покмарки, песчаные волны, выходы коренных пород и пр.), а также различные техногенные объекты (существующие трубопроводы, затонувшие суда, взрывоопасные предметы и пр.). Металлические объекты с большой степенью достоверности позволяет обнаружить *гидромагнитная съемка*.

Для изучения верхней части донных отложений наиболее широкое применение нашли *сейсмические* и *сейсмоакустические методы*. В зарубежной научной литературе [например, Arthur et al., 2012; Thomas et al., 2012] сейсмические приемоизлучающие системы, применяемые при проведении морских инженерно-геологических изысканий, принято классифицировать по разрешающей способности и частотному составу записи [Шматков и др., 2015]:

1. Высокоразрешающая сейсморазведка (*eng. high resolution seismic, HR*) – 80-375 Гц;
2. Сверхвысокоразрешающая сейсморазведка (*eng. very high resolution seismic, VHR*) – 375-1500 Гц;
3. Ультравысокоразрешающая сейсморазведка (*eng. ultra high resolution seismic, UHR*) – 1.5-16 кГц.

В технических стандартах на проведение морских инженерно-геологических изысканий [например, OGP, 2011] и публикациях практического характера [Kvalstad, 2007] ультравысокоразрешающими (*eng. ultra high resolution seismic*) называют приемоизлучающие системы, работающие в частотном диапазоне свыше 300-500 Гц, а более высокочастотные системы называют ультра-ультравысокоразрешающими (*eng. ultra-ultra high resolution seismic, иUHR*) [Шматков и др., 2015].

В отечественной литературе при классификации морских сейсмических наблюдений подчеркивают используемый диапазон частот, поэтому последним двум пунктам соответствуют термины *сейсмоакустические* (применяются одно- и многоканальные сейсмические косы, а в качестве источника – спаркер, гидро- и пневмопушки небольшого объема) и *акустические* (бумер, высокочастотный профилограф) наблюдения. Иногда также используют термины *низко- и высокочастотное непрерывное сейсмоакустическое профилирование* (НСАП) [Шматков и др., 2015].

Высокоразрешающая сейсморазведка применяется для решения задач, требующих достижения глубинности съемки более 1000 м, что обеспечивается использованием группы пневматических источников и сейсмической косы длиной не менее 1000 м.

Основные параметры приемоизлучающих систем, применяемых в настоящее время при проведении инженерно-геологических изысканий на акваториях, представлены ниже (Таблица 2). В зависимости от решаемой задачи и параметров используемого оборудования некоторые величины могут быть отличными от представленных.

Таблица 2: Параметры сейсмических и сейсмоакустических методик, применяющихся при проведении инженерно-геологических изысканий

	Высокоразрешающая сейсморазведка	Многоканальное НСАП	Одноканальное НСАП	Высокочастотное профилирование
Длина косы, м	1200	150 - 300	< 10	-
Число каналов	96 - 192	48 - 96	1	1
Расстоянием между каналами, м	3.125, 6.25 или 12.5	3.125 или 6.25	-	-
Шаг возбуждения, м	6.25 или 12.5	1.5625 или 3.125	≤ 3.125	≤ 1.5625
Полоса частот, Гц	70 - 250	150 - 750	250 - 2 500	2 000 - 16 000
Разрешающая способность по вертикали, м	2.5 - 5	0.5 - 1.5	0.25 - 0.75	≤ 0.25
Глубинность, м	≥ 1000	≈ 150	≈ 50	≈ 10 - 15
Разрешение по горизонтали, м (глубина воды 25 м)	≈ 30	≈ 20	≈ 12.5	≈ 4
Разрешение по горизонтали, м (глубина воды 50 м)	≈ 50	≈ 35	≈ 17.5	≈ 6

Межпрофильное расстояние при проведении всех видов профильных наблюдений определяется заданным масштабом (Таблица 3) и поставленной задачей. Согласно рекомендациям профессиональных ассоциаций (например, OGP, C-NLOPB) при выборе сети профилей также необходимо учитывать глубину воды (Таблица 4). В отдельных случаях сеть наблюдений может сгущаться или разряжаться в 1.5-2 раза при наличии соответствующих обоснований. Поперечные профили выполняются вкрест основного направления с увеличенным (в 3-5 раз) расстоянием между ними [СП 11-114-2004].

При проведении детальных работ с использованием многолучевого эхолота на мелководных акваториях (с глубиной менее 10-20 метров) межпрофильное расстояние может составлять порядка 10-15 метров в связи с небольшой шириной покрытия, а при гидромагнитных и гидролокационных съемках с целью обнаружения неразорвавшихся снарядов сеть профилей в отдельных случаях сгущается до 5-10 метров.

Таблица 3: Расстояние между профилями съемки в соответствии с [СП 11-114-2004]

Масштаб съемки	1:200 000	1:100 000	1:50 000	1:25 000	1:10 000	1:5 000	1:2 000
Межпрофильное расстояние, км	10 - 2	5 - 1	1 - 0.25	0.5 - 0.125	0.2 - 0.05	0.1 - 0.025	0.05 - 0.02

Таблица 4: Расстояние между профилями съемки в зависимости от глубины воды [OGP, 2011]

Глубина воды, м	< 25	25 - 150	150 - 750	> 750
Межпрофильное расстояние, м	25 - 50	50	50 - 100	> 150

Для изучения инженерно-геологических условий территории нефтегазоносной структуры или ее части, а также для изучения района предполагаемого размещения нефтегазопромысловых сооружений и инженерных коммуникаций изыскания выполняются в масштабе 1:25 000 или крупнее (при наличии обоснования). На площадке размещения ППБУ или бурового судна

инженерно-геологическая съемка выполняется в масштабах 1:5 000 - 1:10 000 на площадке 5×5 км, а для СПБУ – 3×3 км. Около устья скважины сеть профилей может быть сгущена в два раза. Если положение гидротехнического сооружения определено, то инженерно-геологические изыскания выполняются в масштабах 1:10000 – 1:25000 на площади не менее 1×1 км. Съемка линейных объектов проводится в коридоре не менее 1 км от оси трассы в масштабе не менее 1:10 000 [СП 11-114-2004; OSIG, 2004; СТО Газпром 2-3.7-050-2006; OGP, 2011; C-NLOPB, 2012].

На российском шельфе для проведения большинства инженерно-геологических изысканий на площадках используется сеть профилей 100×200 м со сгущением до 50×100 м (при необходимости), а на трассах трубопроводов – 100×500 м. В приложении А приведен пример сети профилей геофизической съемки на площадке для установки буровой платформы со сгущением профилей на участке 1×1 км вокруг устья скважины.

Дополнительным источником информации о строении геологической среды может являться разведочная трехмерная сейсморазведка. Однако для использования данных в инженерно-геологических целях необходимо подвергнуть их дополнительной высокочастотной обработке [Bulat, Long, 2006; OGP, 2011; Lippus, 2014], в процессе которой особое внимание уделяется ближним удалениям и производится их интерполяция, что позволяет улучшить вертикальную разрешенность сейсмического изображения в верхней части геологического разреза [Selvage et al., 2012; Farouki, Sakamoto, 2013].

Даже учитывая относительно низкую разрешающую способность разведочных трехмерных данных, по сравнению с данными высокоразрешающей сейсморазведки, возможность получения информации в поперечном направлении дает более широкие возможности при интерпретации и выделении опасных геологических явлений. Однако в случае мелководных акваторий – глубиной менее 50-100 метров – большой вынос между источником и косами будет приводить к «размыванию» верхней части разреза из-за больших углов падения волн [Games, 2012], поэтому данные разведочной трехмерной сейсморазведки эффективны при проведении инженерно-геологических изысканий на глубоководных акваториях, где применение стандартного комплекса методов ограничено или не дает необходимых результатов [OGP, 2011; Calarco et al., 2014].

1.3. Эффективность трехмерных сейсмических методов в составе инженерно-геологических изысканий

Не смотря на то, что благодаря развитию многоканальных наблюдений и совершенствованию технологий сейсмоакустических наблюдений существенно увеличился объем и качество информации о строении верхней части донных отложений, относительно редкая сеть профильных наблюдений не позволяет с достаточной точностью отображать

трехмерные особенности и неоднородности [Games, 2012]. Как было показано ранее, опасные инженерно-геологические процессы и явления зачастую имеют ограниченное распространение на площади проведения изысканий и небольшие линейные размеры, значительно меньшие, чем расстояние между соседними профилями съемки. Увеличение плотности профильных наблюдений приводит к существенному увеличению временных и тем самым финансовых затрат: фрахт судна, аренда оборудования, заработная плата экипажа и т.д., что во многих случаях вступает в противоречие со сметой на проведение изысканий.

Основное преимущество любых трехмерных сейсмических методов заключается в том, что информация, приходящая к приемным элементам с различных направлений, регистрируется и обрабатывается совместно, что дает возможность правильно восстановить пространственное положение отражающих границ и получить объемную картину исследуемого объекта, невозможную при профильных наблюдениях [Воскресенский, 2006].

Если опасный инженерно-геологический объект располагается вне линии профиля, то на сейсмическом разрезе он может проявляться как боковое отражение или, в случае небольшого размера, как дифракция. При достаточно большом удалении от линии профиля аномальный объект может быть незаметен в связи с большими углами подхода отраженных волн, либо в связи с недостаточной длиной записи сейсмической трассы, особенно на мелководных акваториях.

Рассмотрим точечный дифрагирующий объект D_{3D} , расположенный вне плоскости профиля двухмерных наблюдений. В случае профильных наблюдений сейсмические данные регистрируются только вдоль одного направления (Рис. 1.3, А). Вследствие этого можно определить только углы распространения волн относительно направления линии профиля. Отражение, полученное от объекта D_{3D} , будет некорректно отображено в точке D_{2D} (Рис. 1.3, Б).

Даже после применения трехмерной миграции к единичному профилю или набору относительно близко расположенных профилей останется неоднозначность в определении положения объекта D_{3D} на полукруглой кривой, перпендикулярной плоскости наблюдений (Рис. 1.3, Б). Для устранения этой неопределенности необходимо иметь возможность при проведении трехмерной миграции анализировать волновое поле в поперечном направлении, что возможно в случае размещения источников и/или приемников вне линии профиля (Рис. 1.3, Б). Это позволяет однозначно определять углы подхода волн в пространстве и корректно восстанавливать истинное положение отражающих объектов, лежащих вне линии профиля [Biondi, 2006; Games, 2012]. Помимо этого, как будет показано ниже, трехмерная миграция позволяет значительно повысить горизонтальную разрешающую способность во всех пространственных направлениях [Lindsey, 1989, Урупов, 2004; Biondi, 2006].

При проведении инженерно-геологических изысканий трехмерные сейсмоакустические наблюдения эффективны при наличии вне линии профиля таких аномальных объектов, как,

например, отдельные валуны, покмарки, газовые карманы и подводные каналы. Опасные инженерно-геологические явления и процессы, имеющие проявления на морском дне, могут быть обнаружены с привлечением данных батиметрической съемки и гидролокации бокового обзора, однако это в любом случае не даст новой информации о строении нижележащей геологической среды.

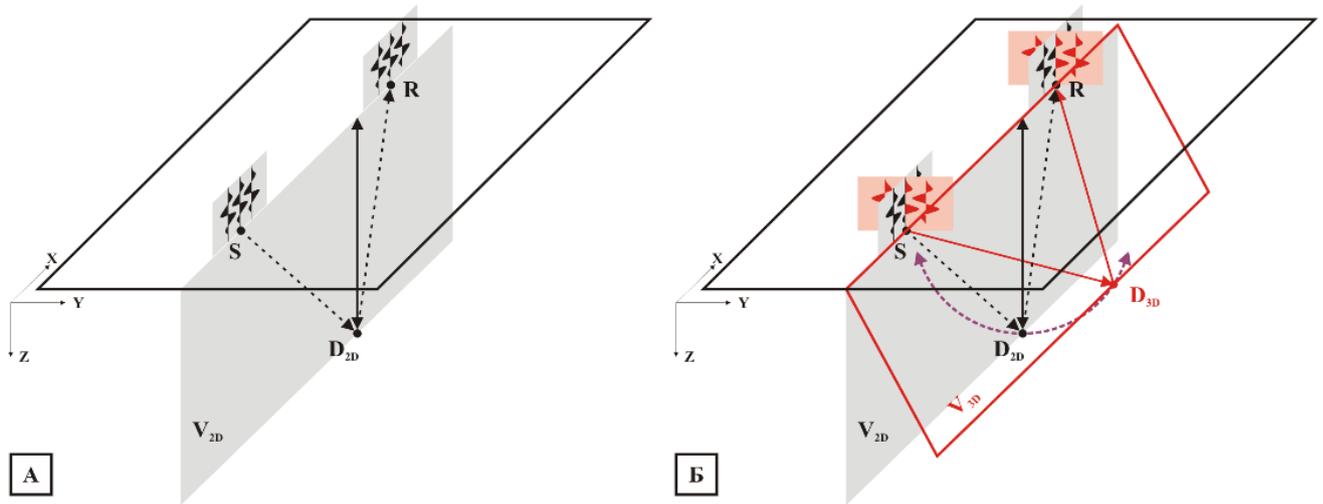


Рис. 1.3: Построение сейсмического изображения в двухмерном (А) и трехмерном (Б) случаях [по Biondi, 2006]

Вторым преимуществом трехмерных сейсмоакустических наблюдений является возможность получения объемного изображения донных отложений и проведения детальной корреляции прочностных свойств грунтов, определяемых прямыми методами, а также картирования опасных инженерно-геологических процессов, имеющих пространственное распространение (например, газонасыщенные осадки, разломы, борозды выпахивания и палеоруслу, песчаные волны и мегарябь, покмарки и грязевые вулканы).

Различие информации о строении донных отложений, получаемой при проведении профильных и площадных наблюдений, может быть проиллюстрировано на основе иллюстрации в работе [Vestrum, Gittins, 2009] следующим образом (Рис. 1.4). При проведении инженерно-геологических изысканий по стандартной сети наблюдений (100×200 м) геологическая среда (Рис. 1.4, А) освещается вдоль профилей съемки (Рис. 1.4, Б). Высокочастотная переобработка данных разведочной трехмерной сейсморазведки (Рис. 1.4, В) позволяет получить данные о строении геологической среды между профилями съемки, однако горизонтальная разрешающая способность не достаточна для картирования мелкомасштабных особенностей, в то время как трехмерные сейсмоакустические наблюдения (Рис. 1.4, Г) позволяет получить детальное изображение геологической среды и опасных инженерно-геологических процессов и явлений.

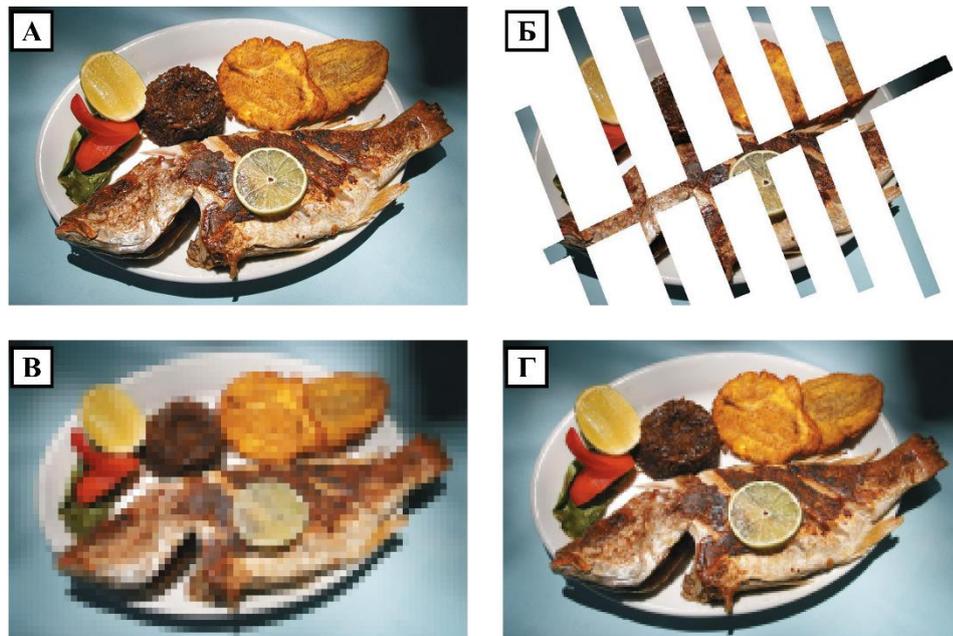


Рис. 1.4: Особенности получения сейсмического изображения геологической среды (А) при проведении профильных (Б), трехмерных сейсмических (В) и сейсмоакустических (Г) наблюдений [по Vestrum, Gittins, 2009]

1.4. Требования к методике трехмерных сейсмоакустических наблюдений в составе инженерно-геологических изысканий

В отличие от 2Д сейсморазведки при проектировании трехмерной съемки гораздо больше степеней свободы и поэтому можно сказать, что в этом случае не существует ни стандартной, ни уникальной системы наблюдений. Методика любой трехмерной сейсмической съемки во многом является компромиссом между качеством данных, пространственной дискретизацией, логистикой и стоимостью выполнения полевых работ [Hansen et al., 1989; Biondi, 2006]. Важную роль играет объект изучения – выбранные параметры приемоизлучающей системы должны позволять получить его сейсмическое изображение с соблюдением требуемой вертикальной и горизонтальной разрешающей способности, при этом данные должны быть надлежащим образом дискретизированы по всем пространственным осям. Особенности проведения исследований на мелководных акваториях накладывают дополнительные ограничения на возможность получения данных с равномерным покрытием.

Опыт проведения сейсмоакустических наблюдений в составе инженерно-геологических изысканий показывает, что некоторые параметры съемки в отсутствии априорной информации не могут быть теоретически обоснованы до начала проведения полевых наблюдений непосредственно в районе исследований. Вследствие этого для достижения поставленных целей и задач необходимо вносить изменения в методику во время проведения опытно-методических или даже опытно-производственных работ. Однако в случае трехмерных наблюдений диапазон этих изменений зачастую ограничен техническими и экономическими факторами.

Для определения требований к системе трехмерных сейсмоакустических наблюдений необходимо задать *диапазон глубин* акватории в районе исследований и характерные *углы наклона* поверхности дна, нижележащих отражающих горизонтов и *глубину их залегания*, поскольку в случае их значительного изменения для различных участков акватории может понадобиться коррекция выбранных параметров приемоизлучающей системы. Локальные геологические (валуны, скальные выходы и т.д.) или техногенные (трубопровод, кессон, бетонный якорь и т.д.) объекты в верхней части донных отложений могут быть описаны в терминах *длины, ширины, мощности*.

Важным вопросом является выбор сейсмической скорости для расчета параметров системы наблюдений. Поскольку при проведении сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях изучается только верхняя часть донных отложений, то зачастую в пределах акустического фундамента интервальные скорости изменяются в незначительных пределах. В связи с этим для расчетов может использоваться средняя скорость (V_{ave}). В предположении постепенного изменения свойств придонных осадков с глубиной также может использоваться скорость, линейно возрастающая с глубиной (1):

$$V_z = V_0 + kZ, \quad (1)$$

где V_0 – начальная скорость (м/с), k – константа (как правило $k > 0$), Z – глубина (м) [Margrave, 1997; Liner, Underwood, 1999]. Для определения значений параметров возле отражающего горизонта может учитываться интервальная скорость (V_{int}).

Большинство формул и подходов к оценке параметров методики морских трехмерных сейсмоакустических наблюдений основываются на предположении, что приемоизлучающая система представляет собой несколько сейсмических кос, буксирующихся за судном на равном расстоянии. Один или несколько источников также буксируются на некотором удалении от судна. Подобная система наблюдений называется параллельной [Урупов, 2004]. Схематическое изображение подобной системы представлено ниже (Рис. 1.5). При использовании более сложных систем наблюдений, часть расчетов необходимо осуществлять с учетом их особенностей.

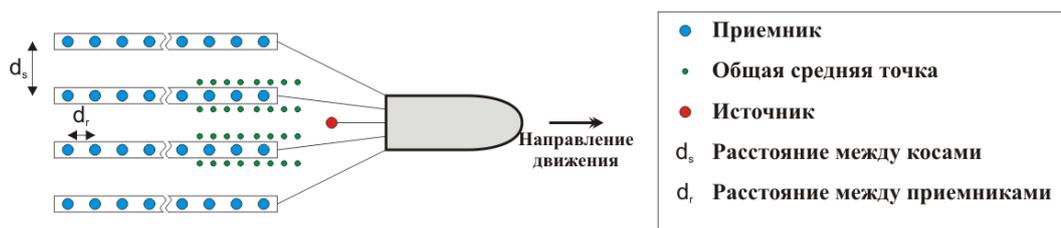


Рис. 1.5: Схема стандартного взаимного расположения элементов трехмерной приемоизлучающей системы

Вертикальная и горизонтальная разрешающая способность

Традиционно в сейсморазведке разрешающая способность определяет то минимальное различие между двумя объектами, при котором можно утверждать, что имеется не один объект, а два объекта. Применительно к сейсмическим волнам можно говорить о том: 1) как далеко (в пространстве и времени) должны отстоять две поверхности, чтобы их можно было выделить как две самостоятельные отражающие границы, и 2) насколько две структуры, относящиеся к одной поверхности раздела, должны быть разделены в пространстве, чтобы проявиться как отдельные морфологические образования [Шериф, Гелдарт, 1987].

Теоретические вопросы, связанные с **вертикальной разрешающей способностью** сейсмических методов, рассмотрены в большом количестве научных публикаций [например, Widess, 1973; Kallweit, Wood, 1982; Калинин и др., 1992; Okaya, 1995; Vermeer, 1999].

В случае использования импульсов малой длительности не возникало бы проблем разрешения двух отражений от близкорасположенных горизонтов, однако физически реализуемые сигналы содержат ограниченный диапазон частот и поэтому имеют значительную длительность, что затрудняет корреляцию и выделение границ в условиях сильной интерференции. Необходимо также отметить, что высокое разрешение определяется не только присутствием высоких частот в спектре сигнала, но и самой полосой частот. Для получения сейсмических данных высокого разрешения крайне важно, чтобы полоса частот была максимально широкой [Ashton et al., 1994].

На практике используются различные критерии вертикальной разрешенности, представленные ниже (Рис. 1.7). Как правило, для приближенной оценки вертикальной разрешающей способности сейсмоакустических наблюдений используется критерий Рэля, согласно которому максимальная разрешающая способность равна четверти длины волны ($\lambda/4$).

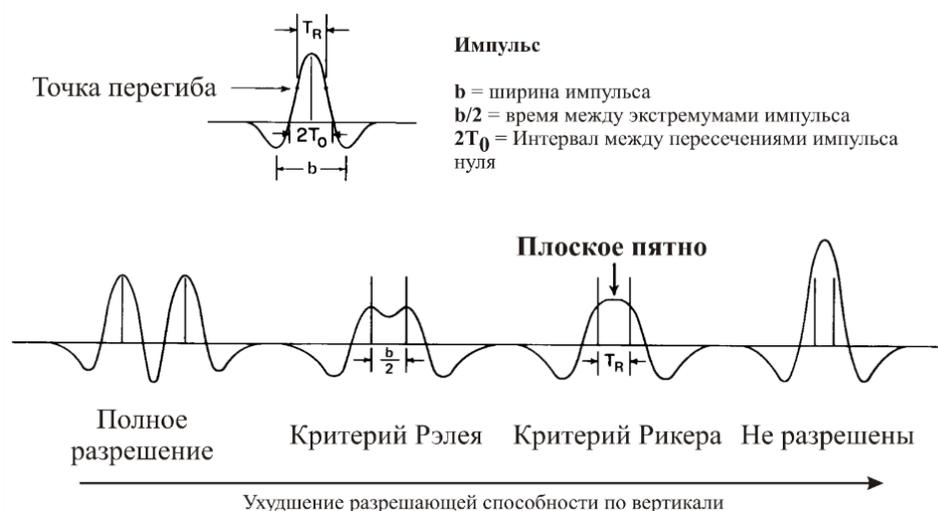


Рис. 1.7: Критерии вертикальной разрешающей способности [по Kallweit, Wood, 1982]

Для теоретических расчетов вертикальной разрешающей способности может быть использована формула (2), предложенная в работе [Vermeer, 1999]:

$$R_z = \frac{cV}{2f_{max} \cos i'} \quad (2)$$

где R_z – вертикальная разрешающая способность (м), c – постоянная, зависящая от используемого критерия разрешенности, V – интервальная скорость (м/с), f_{max} – максимальная частота в спектре сигнала (Гц), $\cos i'$ – косинус половинного угла, образованного линиями, соединяющими источник и приемник с точкой на отражающем горизонте. Также $\cos i'$ можно интерпретировать как фактор растяжения сейсмической трассы при вводе нормальных кинематических поправок. В большинстве случаев параметр c должен приниматься равным 0.715, что соответствует критерию Рэля. В более строгом случае параметр c должен быть равен 0.25 [Cordsen et al., 2000].

Для численной оценки вертикальной разрешающей способности фактически зарегистрированных сейсмических данных некоторыми авторами [например, Kallweit et al., 1982; Калинин и др., 1992; Окава, 1995] предлагается использовать синтетическую модель выклинивающегося слоя. В этом случае анализируются амплитуды центральных экстремумов (A_k , «кажущиеся амплитуды») импульсов, соответствующих двум отражающим горизонтам, и расстояния между ними (T_k , «кажущаяся мощность»). Критерием максимальной разрешающей способности по амплитуде будет являться время отрицательного экстремума A_k , в то время как точка пересечения кривой T_k , будет определять максимальное разрешение по мощности.

Таким образом, максимальная частота f_{max} (Гц), необходимая для обнаружения геологического объекта заданной мощности, должна удовлетворять условию (3):

$$f_{max} \geq \frac{0.4V}{R_z}, \quad (3)$$

или более строго (4):

$$f_{max} \geq \frac{V}{4R_z}, \quad (4)$$

где R_z – требуемая разрешающая способность (наименьшая мощность целевого геологического объекта) (м). Интервал дискретизации должен учитывать условия временного алиасинга. Вопросы, связанные с этим, хорошо изучены и изложены в ряде работ [например, Шерифф, Гелдарт, 1987; Хаттон и др., 1989; Yilmaz, 2001].

Как было показано выше, для картирования мелкомасштабных опасных инженерно-геологических объектов, явлений и процессов требуется вертикальное разрешение порядка 0.5 м. Это может быть достигнуто, если максимальная частота в спектре, согласно формуле (4), больше 750 Гц.

Наиболее широко распространенным критерием *разрешающей способности по горизонтали* до миграции в сейсморазведке считается диаметр первой зоны Френеля. Два

отражающих объекта, попавшие в эту зону, не могут быть идентифицированы по отдельности при проведении съемки с поверхности, а отражающие объекты меньшего размера будут формировать дифракции на временных разрезах [Knapp, 1991; Cordsen et al., 2000]. В большинстве классических работ [например, Sheriff, 1980; Пейтон, 1982; Lindsey, 1989; Cordsen et al., 2000; Yilmaz, 2001] вопросы горизонтальной разрешающей способности рассматриваются для монохроматических волн, отраженных от плоскопараллельной границы.

Для сферических волн радиус первой зоны Френеля (m) (Рис. 1.8, а) определяется как (5):

$$R_f \approx \sqrt{\frac{z\lambda}{2}} = \frac{V}{2} \sqrt{\frac{t_0}{f}}, \quad (5)$$

где z – глубина до отражающего горизонта (м), λ – длина волны (м), V – средняя скорость (м/с), t_0 – время пробега (с), f – частота (Гц). В случае плоской волны, которой можно аппроксимировать поле источника упругих колебаний в дальней зоне, различия в полупериод между последовательными зонами Френеля должны быть целиком отнесены к части траектории луча от отражающей границы к приемнику и выражение принимает следующий вид (6) [Sheriff, 1980; Шерифф, Гелдарт, 1987]:

$$R_f = \frac{V}{2} \sqrt{\frac{2t_0}{f}}. \quad (6)$$

В работе [Berkhaut, 1984] при определении размера зон Френеля предлагается использовать различие во временах пробега, равное одной восьмой периода волны, что уменьшает их размер.

Первая зона Френеля по различным оценкам формирует до 70% энергии отраженной волны [Пейтон, 1982; Cordsen et al., 2000], поэтому зоны более высоких порядков не учитываются. Если источник и приемник расположены на некотором расстоянии друг от друга, то отражение будет формироваться зоной, размер которой в направлении профиля, в соответствии с работой [Басс, Фукс, 1972], равен (7):

$$R_f = \frac{1}{\cos\theta} \sqrt{2\lambda x}, \quad (7)$$

где θ – угол падения, x – расстояние между источником и центром зоны Френеля площадки (м).

Поскольку при проведении реальных морских сейсмоакустических наблюдений используются источники упругих колебаний, возбуждающие импульсы в широкой полосе частот, то очевидно, что различным частотным компонентам сейсмического импульса будут соответствовать разные по площади участки отражающей поверхности (Рис. 1.8, б) и энергия отраженной волны будет зависеть от большего количества факторов. В ряде работ [Knapp, 1991; Brühl et al., 1996] рассматриваются зоны Френеля для широкополосных сигналов и теоретически обосновано, что для них в качестве меры горизонтальной разрешающей способности до миграции также возможно использовать диаметр первой зоны Френеля, который будет зависеть как от центральной частоты сигнала, так и от ширины спектра.

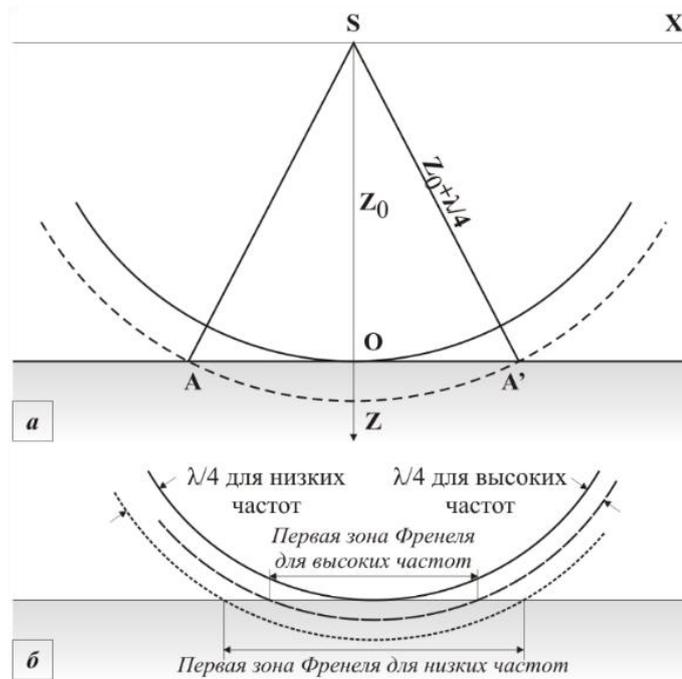


Рис. 1.8: Определение первой зоны Френеля для сферической волны (а) [по Yilmaz, 2001] и влияние частотного состава на ее размер [по Пейтон, 1982]

В работах [Torey, 1970; Knapp, 1991; Brühl et al., 1996] показано, что суммарный сейсмический отклик от плоской площадки можно разложить на две компоненты: отражение от поверхности и краевые эффекты (дифракции), что может быть описано следующей формулой (8):

$$S(t) = \frac{ch}{2h^2} \delta(t - T_0) - \frac{ch}{2\xi^2} \delta(t - T), \quad (8)$$

где $S(t)$ – отраженная волна, c – константа, пропорциональная коэффициенту отражения и включающая в себя функцию источника, T_0 и T – двойное время пробега волны до центра и края площадки соответственно (с), h – глубина площадки (м), ξ – расстояние от центра до края отражающей площадки (м). Первый член уравнения описывает волну, отраженную от площадки, характеристики которой не зависят от радиуса площадки (ξ) и ее амплитуда будет зависеть только от глубины и параметра c . Второй член уравнения описывает дифракции, полярность которых будет обратная и их амплитуда будет зависеть от радиуса площадки (ξ).

Рассматривая горизонтальную разрешающую способность в терминах дифракций, можно говорить, что два дифрагирующих объекта не различимы до миграции, если расстояние между ними меньше диаметра первой зоны Френеля. Поскольку в процессе миграции происходит сжатие дифрагированных волн, то разумно предположить, что миграция повышает горизонтальную разрешающую способность. Так, например, при миграции с продолжением волнового поля в нижнее полупространство точка наблюдения будет все ближе располагаться к отражающей поверхности, и размер первой зоны Френеля будет уменьшаться [Yilmaz, 2001]. В случае двумерной миграции первая зона Френеля уменьшается только в направлении профиля сейсмической съемки и ее форма становится эллиптической с эксцентриситетом ≈ 0.1 (Рис. 1.9).

Трехмерная миграция позволяет уменьшить размер первой зоны Френеля во всех направлениях, что существенно повышает горизонтальную разрешающую способность [Lindsey, 1989]. Неподходящий или неточный алгоритм миграции, недостаточная апертура миграции, пространственный алиасинг, некорректная скоростная модель среды, а также недостаточная или неравномерная пространственная дискретизация сейсмических данных будут ограничивать возможности улучшения разрешающей способности по горизонтали [Lindsey, 1989; Yilmaz, 2001]. Для этого расстояние между соседними трассами не должно превышать половину длины волны ($\lambda/2$) для наибольшей ожидаемой частоты.

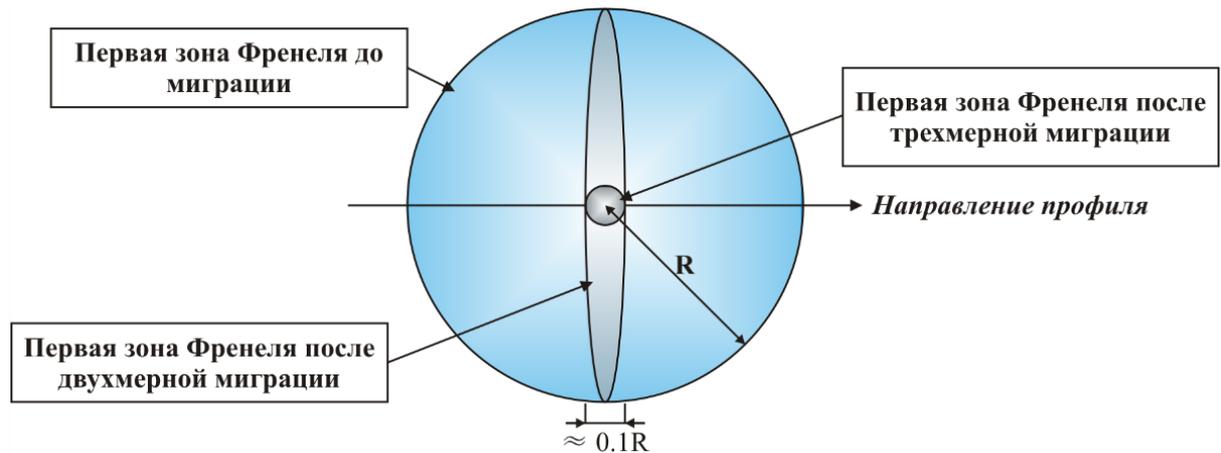


Рис. 1.9: Зона Френеля до и после двухмерной и трехмерной миграции [по Lindsey, 1989]

Поскольку разрешающая способность сейсмического изображения геологической среды фактически определяется результатами миграции, то при неоптимальном выборе размеров апертуры на этапе обработки могут возникнуть негативные эффекты. Так, если апертура слишком мала, то на мигрированном разрезе могут пропадать наклонные отражающие границы, и наоборот, если апертура велика, информация может собираться вдоль гиперболы с тех мест разреза, где отражения от данной точки имеют незначительную энергию. Все это может привести к возникновению дополнительных шумов на сейсмическом изображении [Воскресенский, 2006]. В случае редкого пространственного шага наблюдений количество сейсмических трасс, относящихся к апертуре миграции, может оказаться недостаточным, особенно при работе в мелководных обстановках.

Размер бина и кратность наблюдений

Разрешенность трехмерного сейсмического куба, получаемого после всех процедур обработки и проведения миграции, определяется **размером бина**, выбор которого является компромиссом между геолого-геофизическими и экономическими целями. Уменьшение его размера позволяет достигнуть высокой детальности исследований и избежать пространственного алиасинга, но это требует увеличения плотности наблюдений, что повышает финансовые затраты на проведение полевых работ [Ashton et al., 1994; Liner, Underwood, 1999; Missiaen, 2005].

Увеличение размера бина повышает кратность наблюдений и, как следствие, отношения сигнал/шум, однако пространственная разрешающая способность уменьшается. Также высокая плотность наблюдений позволяет более эффективно применять процедуры шумоподавления на этапе обработки.

Специфика проведения сейсмоакустических наблюдений на акваториях приводит к неравномерному распределению общих средних точек в пространстве, вследствие чего могут образовываться бины с нулевой кратностью, и на этапе проведения полевых работ требуется выполнение дополнительных профилей для их заполнения. При обработке данных нулевые бины могут быть заполнены путем интерполяции, при суммировании по переменным ячейкам (так называемый flex-binning), либо путем изменения параметров сетки бинирования. В связи с этим при бинировании необходимо учитывать решаемые задачи и особенности полученных данных.

Как правило, размер бина и расстояние между соседними бинами равны, а предпочтительной формой является квадрат. Прямоугольные бины могут использоваться для уменьшения затрат на выполнение полевых работ, если форма геологических объектов известна и не требуется высокое разрешение по всем пространственным осям [Cordson et al., 2000; Vermeer, 2012]. Оптимальный размер бина равен наименьшему значению следующих факторов:

1. Размеры наименьшего геологического объекта, который необходимо идентифицировать;
2. Ограничения, накладываемые пространственным алиасингом;
3. Требуемая горизонтальная разрешающая способность.

Для достоверного выделения инженерно-геологических объектов, явлений и процессов необходимо, чтобы как минимум 2-3 сейсмические трассы проходили через них. Тогда на временном срезе сейсмического куба они будут выражены 4-9 точками. Таким образом, первая оценка размера бина определяется формулой (10):

$$B \leq \frac{\Delta x}{3}, \quad (10)$$

где B – размер бина (м), Δx – наименьший линейный размер геологического объекта (м).

Для предотвращения пространственного алиасинга размер бина должен удовлетворять следующему выражению (11):

$$B \leq \frac{v}{4f_{max} \sin \theta}, \quad (11)$$

где f_{max} – максимальная частота, не подверженная пространственному алиасингу (Гц), θ – угол наклона отражающего горизонта [Ashton et al., 1994; Missiaen, 2005]. Для горизонтальной границы размер бина должен быть не менее радиуса первой зоны Френеля. Для учета градиента скорости необходимо использовать следующее уравнение (12) [Liner, Underwood, 1999; Cordson et al., 2000]:

$$B \leq \frac{v(z)}{4f_{max} \sin \theta}, \quad (12)$$

Поскольку при миграции происходит уменьшение частот на всех наклонных отражающих горизонтах, то при наличии алиасинга исходных данных высока вероятность проявления дисперсии частот. Связь между размером бина и максимальной частотой после миграции определяется аналогичными уравнениями, приведенными выше, с заменой $\sin \theta$ на $\tan \theta$ (Рис. 1.10) [Cordsen et al., 2000].

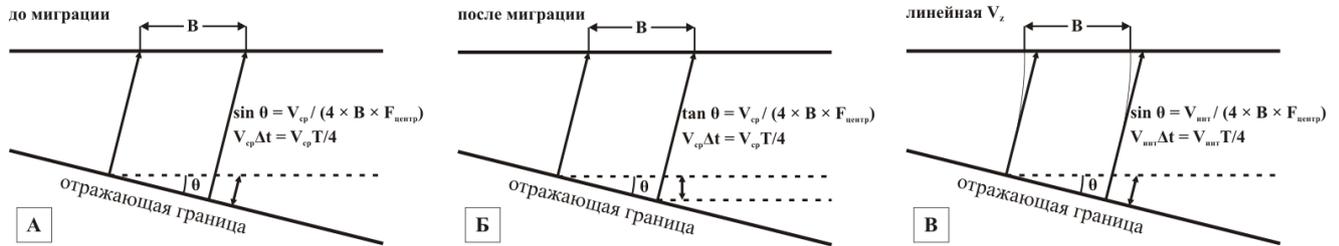


Рис. 1.10: Размер бина для наклонной границы [по Cordsen et al., 2000]

Рассмотрим требования к размеру бина для достоверной идентификации мелкомасштабных опасных инженерно-геологических объектов, явлений и процессов (например, валунов, покмарок), имеющих линейные размеры в 1 м. При средней скорости упругих колебаний в воде 1500 м/с, максимальной частоте в спектре 1500 Гц и угле отражающего горизонта 60° размер бина, в соответствии с формулой (11), должен быть не более 0.3 м. Такую же оценку можно получить и по формуле (9). Для угла наклона отражающего горизонта, равного 30° , размер бина должен быть не более 0.5 м, что также удовлетворяет формуле (9). При увеличении максимальной частоты ограничения, накладываемые на размер бина условиями пространственного алиасинга, возрастают (Рис. 1.11). В связи с этим дальнейшее уменьшение размера бина становится экономически нерентабельным.

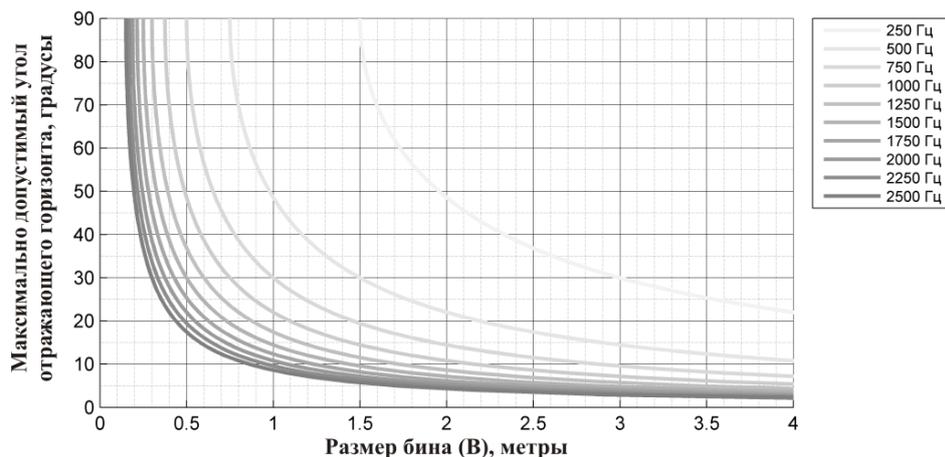


Рис. 1.11: Зависимость максимального угла наклона отражающей границы, неподверженной алиасингу, от размера бина и частоты

Качество исходных сейсмических данных, определяемое отношением сигнал/шум, во многом зависит от **кратности наблюдений** – количества сейсмических трасс, относящихся к

одному бину [Шерифф, 1987; Cordsen et al., 2000; Yilmaz, 2001]. В случае площадных наблюдений возможно корректно учесть энергию волн, отраженных от объектов, расположенных вне плоскости съемки, что уменьшает уровень шума сейсмического изображения среды. Особенно сильно это проявляется в случае недостаточной дискретизации получаемых данных по пространственным осям. Пространственный алиасинг приводит к уменьшению отношения сигнал/шум на этапе обработки в процессе применения любой многоканальной операции, особенно миграции [Yilmaz, 2001; Long, 2003; Vermeer, 2012]. Следовательно, неравномерная кратность будет приводить к образованию различных артефактов и увеличению уровня шума, что в конечном счете скажется на полученных результатах в целом, что подтверждает необходимость получения равномерно распределенных данных по всей площади исследований.

Для получения детального трехмерного сейсмического изображения геологической среды увеличение отношения сигнал/шум должно сопровождаться повышением плотности наблюдений. При небольшом отношении сигнал/шум получаемые результаты различаются незначительно (Рис. 1.12, первый столбец), в то время как при его увеличении разрешающая способность и общее качество получаемых данных в большей степени определяется пространственной дискретизацией, нежели количеством некоррелированного шума (Рис. 1.12, последний столбец) [Long, 2003].



Рис. 1.12: Взаимное влияние пространственной дискретизации и отношения сигнал/шум на качество сейсмического изображения

Поскольку трехмерные сейсмические съемки не нуждаются в кратности аналогичной профильным наблюдениям [Ashton et al., 1994; Cordsen et al., 2000], то для получения сейсмоакустических данных с достаточным отношением сигнал/шум необходимо выполнение следующего условия (13):

$$F_{3D} \geq F_{2D} \sqrt{\frac{\Delta x \Delta y}{2R_f dx}}, \quad (13)$$

где F_{2D} и F_{3D} – кратность двухмерной и трехмерной съемок, Δx и Δy – размеры бина в продольном и поперечном направлении соответственно (м), R_f – радиус первой зоны Френеля (м), dx – расстояние между соседними пунктами возбуждения профильных наблюдений (м). Также кратность можно оценить по формуле (14), приведенной в работе [Cordsen et al., 2000]:

$$F_{3D} = F_{2D} \times \frac{B_{3D}^2 \times f \times \pi \times 0.401}{B_{2D} \times V}, \quad (14)$$

где B_{2D} и B_{3D} – размер бина для двухмерной и трехмерной съемки соответственно, f – центральная частота (Гц), V – интервальная скорость (м/с).

Рассчитаем, например, минимальную кратность трехмерных сейсмоакустических наблюдений с учетом типичных параметров профильных наблюдений при глубине воды менее 50 м: кратность 16-24, размер бина 1-2 м, расстояние между пунктами возбуждения 2-3.125 м, центральная частота 1500 Гц. Для размера бина трехмерных наблюдений, равного 0.5-1 м, требуемая кратность должна быть не менее 3 (по формулам (13) и (14)).

При планировании трехмерных съемок также необходимо учитывать зоны неполной кратности, характеризующиеся меньшими значениями отношения сигнал/шум и недостаточностью сейсмической информации для проведения миграции. Для проведения интерпретации в пределах зоны полной кратности необходимо обеспечить получение данных на значительно большей площади (Рис. 1.13). Вследствие этого необходимо расширить границы съемки как минимум на величину, определяемую следующим выражением (15):

$$x_{migr} = z \tan \theta, \quad (15)$$

где z – эхо-глубина до отражающего горизонта (м), θ – угол его наклона.

При проведении любых трехмерных сейсмических наблюдений на массивах данных проявляются отпечатки системы наблюдений, так называемые футпринты. Основная причина их появления – неравномерное распределение сейсмических трасс в бинах и пространстве [Monk, 1999; Череповский, 2009]. В морских трехмерных сейсмических данных они, как правило, проявляются в виде линейных аномалий вдоль профилей съемки (Рис. 1.14).

При использовании многоканальных приемных систем изменение дискретизации удалений в процессе съемки, вызванные, например, сносом сейсмической косы или большим интервалом между пунктами возбуждения, приводит к увеличению эффекта [La Bella et al., 1998; Vermeer,

2012]. Отпечатки системы наблюдений в значительной степени ограничивают возможности динамической интерпретация сейсмических данных и применение атрибутивного анализа. Структурная интерпретация также может быть затруднена [Vermeer, 2012].

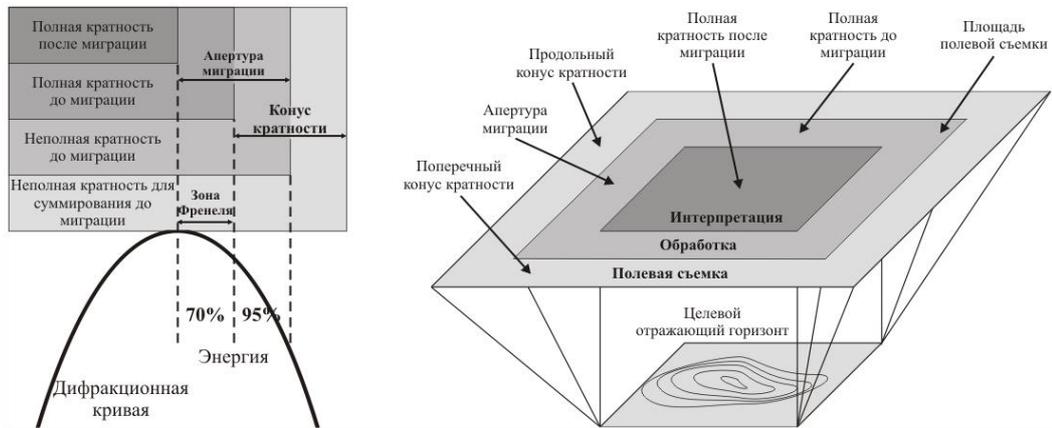


Рис. 1.13: Схема формирования зон различной кратности [по Cordsen et al., 2000]

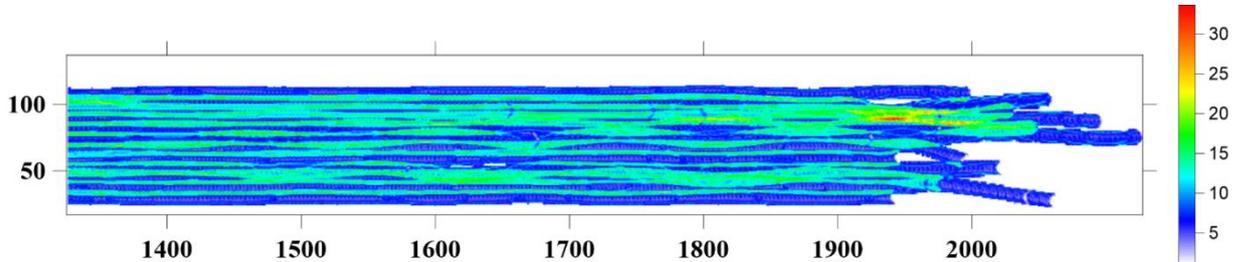


Рис. 1.14: Пример проявления отпечатка системы наблюдений на карте кратности

Для уменьшения влияния отпечатка системы наблюдений на трехмерные сейсмические данные в первую очередь необходима регулярная дискретизация, что может быть достигнуто только в случае съемки с повторением соседних профилей (так называемая идеальная параллельная геометрия) [Vermeer, 2012], однако это практически не достижимо в связи с неконтролируемым сносом сейсмических кос и неравномерным распределением удалений и общих средних точек. Увеличение кратности наблюдений и уменьшение размеров бина в совокупности с равномерным распределением удалений позволяет минимизировать негативные эффекты [Monk, 1999; Череповский, 2009].

Требования к геометрии системы наблюдений

Выбор геометрии наблюдений является важным фактором, непосредственно влияющим на экономическую эффективность используемой приемоизлучающей системы, в связи с высокой стоимостью морского сейсмического оборудования и фрахта судна для проведения полевых работ. Основной целью на этапе планирования съемки является оптимизация временных затрат на проведение сейсмоакустических наблюдений, что может быть достигнуто либо увеличением скорости съемки, либо увеличением объема данных, получаемых за один проход судна по

профилю. Площадь акватории, которая покрывается бинами (точками ОГТ) с ненулевой кратностью, при единичном проходе судна по профилю будем называть шириной покрытия.

При увеличении скорости движения судна потребуется уменьшить временной интервал возбуждения упругих колебаний, что не всегда возможно с технической точки зрения, поэтому для повышения экономической эффективности съемки предпочтительно использовать приемоизлучающие системы с максимально широкой полосой покрытия. В случае трехмерных сейсмических наблюдений на акватории это может быть достигнуто путем увеличения количества приемных элементов в направлении, поперечном линии съемки. При этом для достижения требуемого пространственного разрешения и кратности необходимо задать требования к геометрии наблюдений – определить расстояние между сейсмическими косами, пунктами возбуждения и профилями съемки.

Расстояние между приемными элементами в поперечном направлении определяется формулой (16):

$$\Delta RL = 2B, \quad (16)$$

где ΔRL – расстояние между приемными элементами (м), B – размер бина (м) [Vermeer, 2012].

Шаг между возбуждениями упругих колебаний определяется размером бина, требуемой кратностью наблюдений и техническими характеристиками приемной системы. В случае использования нескольких одноканальных сейсмических кос, буксирующихся параллельно (подробное описание современных методик трехмерных сейсмоакустических наблюдений представлено ниже в главе 2), расстояние между соседними пунктами возбуждения определяется по формуле (17) следующим образом:

$$\Delta S \leq \frac{B}{F}, \quad (17)$$

где ΔS – шаг между пунктами возбуждения (м), а F – требуемая кратность наблюдений.

При использовании многоканальных сейсмических кос выражение принимает вид (18):

$$\Delta S \leq \frac{N_r \Delta r}{2F}, \quad (18)$$

где N_r – число каналов в сейсмической косе, Δr – расстояние между группами приемников (м).

В случае полного покрытия площади исследований общими средними точками без перекрытия ширина покрытия и, следовательно, необходимое расстояние между соседними профилями съемки определяется по формуле (19):

$$\Delta L = \frac{N_s \times \Delta S}{2}, \quad (19)$$

где ΔS – расстояние между сейсмическими косами (м), N_s – число сейсмических кос.

При выборе параметров геометрии наблюдений необходимо учитывать требования, накладываемые пространственным алиасингом, который появляется, если расстояние между соседними точками приема таково, что разница времени регистрации отраженных волн в них

превышает половину главного периода [Шерифф, Гелдарт, 1987; Missiaen, 2005]. В случае наличия наклонных границ оптимальные требования к расстоянию между последовательными точками наблюдения (Δx) будут определяться следующей формулой (20) [Yilmaz, 2001]:

$$\Delta x \leq \frac{V}{2f_{max}\sin(\theta_{max})}, \quad (20)$$

где θ – угол наклона отражающего горизонта, V – средняя скорость (м/с) и f_{max} – максимальная частота (Гц), которая не будет подвержена алясингу для заданного угла наклона границы.

Минимальное и максимальное удаление, азимутальные характеристики

При проектировании трехмерных сейсмических съемок необходимо проводить анализ распределения удалений и их азимутов в отдельном бине и по площади. Их минимальное и максимальное значение при этом должны удовлетворять поставленным геологическим задачам, а равномерность распределения удалений крайне важна для корректного проведения миграционных преобразований и скоростного анализа. Плохая дискретизация удалений и их азимутов приводит к появлению таких негативных эффектов, как пространственный и временной алиасинг, когерентные помехи, отпечатки системы наблюдений. Некоторые авторы предлагают также анализировать распределение удалений не в отдельном бине, а в пределах первой зоны Френеля [Cordson et al., 2000; Biondi, 2006; Vermeer; 2012].

На сегодняшний день при проведении большинства морских трехмерных сейсмических съемок данные регистрируются в относительно узкой полосе пространства, вследствие чего набор азимутов ограничен и геологическая среда освещается только с одного направления [Урупов, 2004; Long, 2010; Vermeer, 2012]. Наличие различных азимутов в отдельном бине, при их достаточной дискретизованности, позволяет значительно повысить отношение сигнал/шум [Ashton et al., 1994; Canning, Gardner, 1996; Cordson et al., 2000; Biondi, 2006].

Большинство морских широкоазимутальных съемок выполняется путем выполнения повторных наблюдений на площади с изменением геометрии приемоизлучающего массива [Howard, 2007; Buia et al., 2008; Ампилов, Дементьев, 2013] (Рис. 1.15). Отдельно стоит отметить методику съемки по круговым траекториям (*eng. coil shooting*), разработанную компанией WesternGeco. Предпосылками ее применения стало желание сократить непроизводительное время при выполнении разворотов судна для захода на новый профиль при проведении стандартной съемки [Buia et al., 2008], однако это требует применения активных контроллеров заглибления сейсмической косы, что затруднительно при проведении сейсмоакустических наблюдений.

Существующие на данный момент методики трехмерных сейсмоакустических наблюдений следует отнести к узкоазимутальным съемкам. Связано это, в первую очередь, с небольшим количеством приемных элементов и расстоянием между ними в поперечном направлении. С

другой стороны, большинство инженерно-геологических задач на мелководных акваториях не требуют наличия в сейсмическом кубе полного набора азимутов, вследствие чего требования к распределению азимутов и удалений при проведении сейсмоакустических съемок должны быть менее строгими, чем в случае разведочной сейсморазведки.

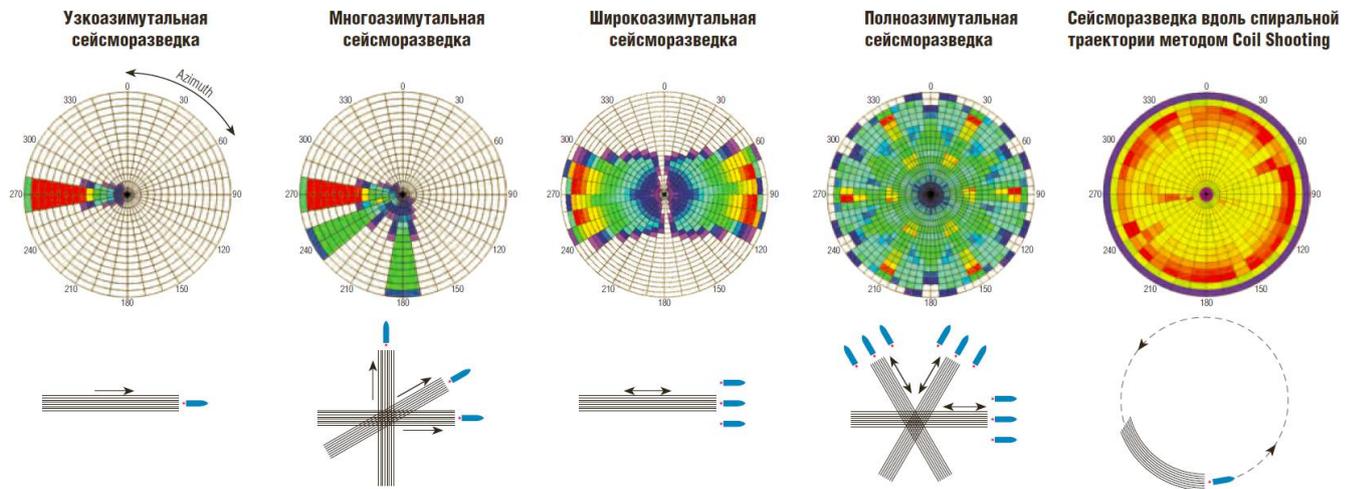


Рис. 1.15: Классификация трехмерных сейсмических съемок по азимутальности [по Buia et al., 2008]

Согласно общей практике планирования сейсмических съемок на акваториях, **минимальное удаление** не должно превышать половины глубины моря в районе исследований. В соответствии с работой [Калинин и др., 1983], минимальное удаление (l , м) может быть вычислено по формуле (21):

$$l \leq z_{min}(-2 \cos \varphi |\sin \varphi| + 2 \cos \varphi \sqrt{\sin^2 \varphi + 0.02a^2}), \quad (21)$$

где a – относительная погрешность (в процентах) определения времени прихода отраженной волны, z_{min} – минимальная глубина воды (м) и φ – угол наклона отражающей границы.

Максимальное удаление, при использовании многоканальных сейсмических кос, должно быть достаточно большим для корректного определения скоростей упругих колебаний, подавления кратных волн и проведения миграции. В простейшем случае считается, что для решения поставленных задач оно должно быть равно эхо-глубине целевого горизонта [Ashton et al., 1994; Cordsen et al., 2000; Yilmaz, 2001].

В связи с небольшой глубиной сейсмоакустических исследований на мелководных акваториях использование многоканальных сейсмических кос ограничивается рядом факторов, снижающих их эффективность и повышающих затраты на проведение съемки:

- неконструктивная интерференция прямой и отраженной волн;
- выход в первых вступлениях преломленных и рефрагированных волн;
- большое растяжение сейсмического импульса при вводе кинематических поправок;
- большие углы подхода отраженных волн.

Аналогичные эффекты возникают и при использовании приемных элементов, распределенных в пространстве, т.е. трехмерных сейсмоакустических систем. Поэтому при проектировании системы трехмерных наблюдений, позволяющей с достаточной детальностью получить сейсмическое изображение верхней части донных отложений, необходимо ограничивать максимальные удаления и использовать относительно короткие сейсмические косы.

Для предотвращения интерференции с прямой волной на дальних каналах необходимо, чтобы максимальное удаление удовлетворяло следующему неравенству (22), которое может быть решено относительно заданных значений t_0 , Δt_p , V_{H_2O} и V [Cordsen et al., 2000]:

$$X_{max} < X_p = V_{H_2O} \times \left[\sqrt{\left(t_0^2 + \frac{X_p^2}{V^2}\right)} + \Delta t_p \right], \quad (22)$$

где Δt_p – длина импульса прямой волны (с), X_p – удаление (м), t_0 – время первого вступления отражения от поверхности дна (с), V_{H_2O} – скорость упругих колебаний в воде (м/с), V – среднеквадратичная скорость над целевым горизонтом (м/с). Номограмма для расчета максимально допустимого удаления в зависимости от глубины воды и длины сейсмического импульса представлена ниже (Рис. 1.16).

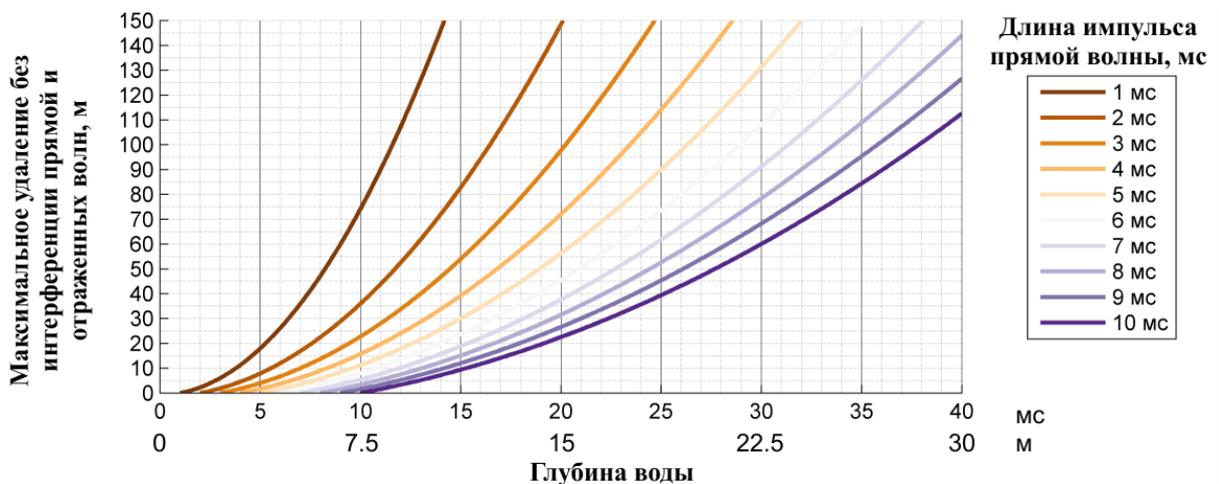


Рис. 1.16: Зависимость максимального удаления без интерференции прямой и отраженной волн от глубины воды и длительности сейсмического импульса

Для предотвращения выхода в первых вступлениях преломленных волн необходимо соблюдение условия, согласно формуле (23) [Cordsen et al., 2000]:

$$X_{max} < X_{ref} = V_{ref} \times \left[\sqrt{t_0^2 + \frac{X_p^2}{V^2}} + \Delta t_p \right], \quad (23)$$

где V_{ref} – скорость в верхнем слое донных отложений (м/с).

Максимальное удаление также должно выбираться с учетом коэффициента растяжения сейсмического импульса при вводе кинематических поправок. Его наибольшее допустимое значение, как правило, равно 20-30% [Cordsen et al., 2000; Гайнанов, 2009; Vermeer, 2013]. Для

приблизительной оценки коэффициента растяжения может быть использована формула (24), приведенная ниже [Knapp, Steeples, 1986]:

$$NMO_{stretch} \approx \frac{x^2}{2V_{NMO}^2 t_0^2}. \quad (24)$$

С учетом требуемой разрешающей способности скоростного анализа $(\frac{\Delta v}{v})$ максимально допустимое удаление определяется по формуле (25) [Ashton et al., 1994]:

$$x_{max} = \sqrt{\frac{2TV^2}{(f_{max}-f_{min})(\frac{\Delta v}{v})}}, \quad (25)$$

где T – время двойного пробега волны до исследуемого горизонта (с), $f_{max} - f_{min}$ – полоса частот (Гц).

Особенности проведения сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях и относительно небольшие вариации скоростей продольных волн в верхней части донных отложений не позволяют в полной мере получать данные, пригодные для проведения вертикального скоростного анализа. В то же время, даже при ограниченном наборе удалений, горизонтальный скоростной анализ может дать грубые оценки скоростей при сильном изменении скоростных характеристик среды с глубиной. Проведенные эксперименты [Шматков и др., 2014] показали, что при наличии сейсмической информации на дальних удалениях может быть построена скоростная модель среды даже при ограниченной длине годографа.

На более глубоководных акваториях скоростные характеристики могут быть получены с использованием сейсмических донных станций. Как правило, станции устанавливаются «конвертом» по площади исследований – по одной станции на углах и одна в центре, что позволяет получить пять полноценных годографа ОГТ и затем экстраполировать полученные данные на всю площадь исследований.

Также информацию о скорости распространения упругих волн можно получить из результатов предыдущих исследований, либо дополнить трехмерную съемку несколькими линиями профилей наблюдений. При этом с экономической точки зрения более выгодно применять такие системы трехмерных сейсмоакустических наблюдений, компоненты которых могут быть оперативно использованы для проведения съемки по методике ОГТ.

1.5. Выводы к главе 1

1. Автором рассмотрены наиболее опасные инженерно-геологические явления и процессы, которые могут представлять существенную угрозу при строительстве и эксплуатации различных гидротехнических сооружений на мелководных акваториях. Делается вывод, что наибольшую опасность представляют объекты линейным размером более 1 метра, а для трубопроводов и кабельных линий опасность могут представлять даже объекты размером более первых десятков сантиметров;
2. Рассмотрена современная практика проведения морских инженерно-геологических изысканий и показано, что съемка по сети профильных наблюдений не позволяет с достаточной точностью изучать опасные инженерно-геологические процессы и явления, определять их пространственное положение, а также картировать объекты в верхней части донных отложений;
3. Поскольку многие опасные инженерно-геологические явления и объекты, влияющие на безопасность установки и эксплуатации инженерных сооружений в мелководной части акватории, имеют площадной характер распространения и залегают ниже поверхности дна, то при проведении изысканий необходимо применять трехмерные сейсмоакустические методы в совокупности с другими видами инженерно-геологических исследований;
4. При проведении трехмерных сейсмоакустических наблюдений в составе инженерно-геологических изысканий вертикальная и горизонтальная разрешающая способность должны быть не хуже 0.5 м, что обеспечивается источником упругих колебаний с центральной частотой не менее 750 Гц. Размер бина получаемого сейсмического куба не должен превышать 0.5 м при средней кратности не менее 3;
5. Предложена последовательность выбора и анализа основных параметров трехмерной сейсмоакустической съемки, позволяющая рассчитать и проанализировать систему наблюдений с учетом задач исследований, параметров геологической среды и особенностей проведения сейсмоакустических работ на мелководных акваториях;
6. В связи с большой вариативностью целей и задач инженерно-геологических изысканий, размеров опасных инженерно-геологических процессов, явлений и объектов необходимо иметь возможность адаптации системы трехмерных сейсмоакустических наблюдений к конкретным условиям съемки непосредственно в полевых условиях.
7. При проведении комплексных инженерно-геологических изысканий предпочтительно использование трехмерных приемоизлучающих систем, характеристики которых позволяют получать кондиционные данные в сейсмогеологических условиях мелководных акваторий, а ширина покрытия сопоставима с другими методами исследований.

Глава 2. Анализ возможностей существующих методик трехмерных сейсмоакустических наблюдений при проведении инженерно-геофизических исследований на мелководных акваториях

Развитие методик трехмерных (3Д) сейсмических наблюдений на акваториях началось в конце 70-х годов XX века [JPT Staff, 1999]. Долгое время их применение было ограничено несовершенством технологий и высокой ценой проведения полевых наблюдений. Однако благодаря преимуществам трехмерных сейсмических данных уже к началу 90-х годов XX века более половины морских разведочных работ проводились по этой методике [Hansen et al., 1989].

За последние несколько десятилетий для использования в разведочной сейсморазведке наблюдения было разработано большое количество различных методик трехмерных наблюдений. В первых трехмерных системах наблюдений использовались 2-3 сейсмические косы, в то время как на сегодняшний день их максимальное число достигает 24 (Рис. 2.1).

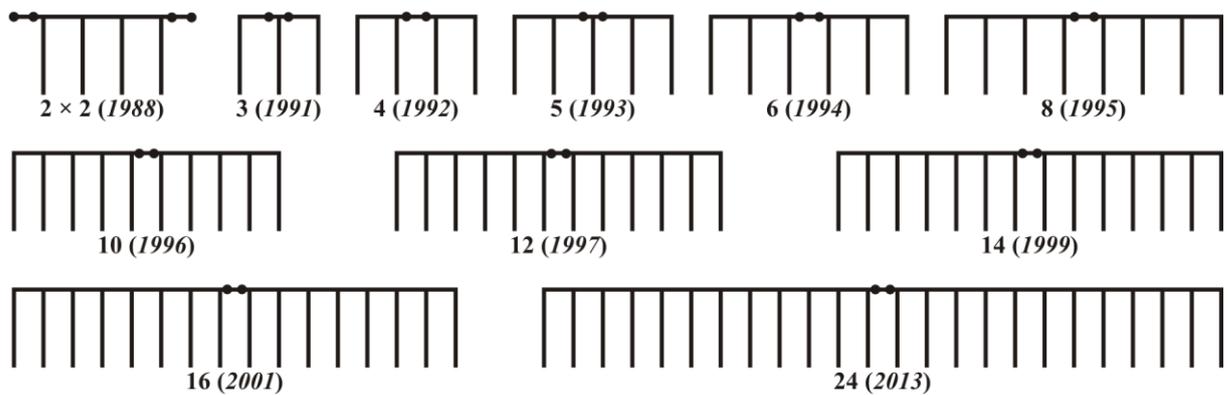


Рис. 2.1: Схематическое изображение эволюции трехмерных систем, применяемых в разведочной сейсморазведке [по Vermeer, 2012]

Основными недостатками разведочной трехмерной сейсморазведки, ограничивающими возможности ее применения для решения инженерно-геологических задач, является низкая частота излучаемого и регистрируемого сигнала, большое расстояние между каналами и соседними косами, равные первым десяткам метров, а также большие углы подхода отраженных волн при работе на мелководных акваториях. При этом стоимость судна и оборудования для проведения подобных исследований значительно превышает бюджет, доступный для выполнения инженерно-геологических изысканий.

Дальнейшим развитием методик сейсмических наблюдений стали 3Д высокоразрешающие системы, основанные на технологиях разведочной сейсморазведки, но с уменьшенным шагом между элементами приемоизлучающего массива. Первые коммерческие работы с ними проводились, например, в конце 1990-х – начале 2000-х годов в Мексиканском заливе компаниями Shell и BP, а также в Северном море. Эти проекты носили единичный характер и

только к началу 2010-х годов компании начали вновь проявлять интерес к данной методике в связи с началом бурения в районах со сложными сейсмогеологическими условиями и наличием большого числа опасных инженерно-геологических явлений и процессов [Hill et al., 2015].

На первоначальном этапе развития трехмерных сейсмоакустических приемоизлучающих систем были проведены эксперименты по адаптации методик профильных наблюдений к новым задачам. Одними из первых подобных экспериментов можно считать работы, проводившиеся в середине 90-х годов XX века в университете Райса (Хьюстон, США). В качестве приемных элементов использовались две одноканальные сейсмические косы (группа из 10 гидрофонов с шагом 1 метр между ними). Косы буксировались на выстрелах на расстоянии 26 метров друг от друга. В качестве источника использовалась гидропушка объемом 15 дм³ с полосой частот от 40 до 2000 Гц, которая буксировалась непосредственно за судном. Во время испытания системы межпрофильное расстояние было выбрано равным 25 метрам, а интервал возбуждения сигнала составил 3 секунды, что при средней скорости судна в 4 узла дало расстояние 6 метров между пунктами возбуждения. Навигация и определение координат осуществлялось при помощи GPS-приемника и системы Navbeacon для получения дифференциальных поправок, что позволило получить координаты с точностью 1-3 метра. Испытания системы проводились в Мексиканском заливе. Их основной целью был поиск месторождений песка и гравия [Abdulah et al., 1997].

Подобные исследования в это же время проводились на побережье Нью-Джерси (США) с использованием излучателя типа "бумер" и 10-канальной приемной системой. При этом фактически был получен набор одноканальных данных с расстоянием между соседними линиями съемки порядка 10 метров [Pulliam et al., 1996]. Поэтому эти методики можно рассматривать только как псевдотрехмерные (2.5Д).

Также ряд полевых наблюдений по схожей методике, но с применением двух многоканальных сейсмических кос по 12 (3.8 метра между каналами) и 24 канала (2 метра между каналами), проводился в университете имени Христиана Альбрехта (Киль, Германия). Расстояние между косам при буксировке составляло 15 метров, а в качестве источника упругих колебаний использовался излучатель типа «бумер» [Müller et al., 2002; Müller, 2005].

Активное развитие полноценных трехмерных сейсмоакустических приемоизлучающих систем для решения различных задач на мелководных акваториях началось в 90-х годах XX века. За последние два десятилетия различными научными группами и компаниями были разработаны различные приемоизлучающие системы, работающие во всех частотных диапазонах, описанных в разделе 1.2 Главы 1. Однако в силу технологических (сложность масштабирования системы), экономических (высокая стоимость оборудования и ограниченный бюджет) и временных (сбор и обработка данных продолжительны во времени) факторов большинство существующих приемоизлучающих систем используется зачастую в научных целях [Шматков и др., 2015].

2.1. Классификация приемоизлучающих систем для трехмерных сейсмоакустических наблюдений

В работе [Thomas et al., 2012] предлагается классифицировать существующие 3D приемоизлучающие системы в соответствии с частотным составом возбуждаемых колебаний, разрешающей способностью и глубиной исследований. Ниже автором приводится список известных на сегодняшний день методик трехмерных сейсмоакустических наблюдений (Таблица 5), объединенных в группы в соответствии с классификацией, данной выше в разделе 1.2 Главы 1. Внутри каждой группы приемоизлучающие системы расположены в порядке публикации результатов их применения и года проведения полевых испытаний.

Хотя принципы получения трехмерного сейсмического изображения во всех системах примерно одинаковые, необходимость расположения приемников на относительно малых фиксированных расстояниях друг от друга, и небольшие глубины буксировки при проведении сейсмоакустических наблюдений требуют очень высокой точности их задания и контроля. Поэтому, в отличие от разведочной 3D сейморазведки, при проведении сейсмоакустических наблюдений применяются самые разнообразные конструкции и способы буксировки [Шматков и др., 2015]. Особенности гидрометеорологических условий района исследований и технические возможности транспортных средств, используемых при работе на мелководных акваториях, также учитываются при выборе способа буксировки приемоизлучающего массива.

Можно выделить три основных способа размещения и буксировки элементов приемоизлучающего массива:

1. **Жесткая рама** позволяет расположить приемники и источники в фиксированных положениях и вся конструкция буксируется за судном тем или иным образом. Также этот способ удобен при использовании телеуправляемых (ТНПА / ROV) и автономных (АНПА / AUV) обитаемых подводных аппаратов;
2. **Выстрелы** – сейсмические косы крепятся к специальным штангам, располагающимся перпендикулярно корпусу судна. Подобные устройства часто являются штатным судовым оборудованием, либо могут быть быстро изготовлены и смонтированы на любое судно;
3. **Параваны** (специальные устройства, предназначенные для отведения сейсмического оборудования в сторону от курса судна) позволяют буксировать сейсмические косы на значительном удалении от судна и отводить их в сторону от линии профиля. Наиболее широко этот способ применяется при проведении разведочной трехмерной сейморазведки.

При использовании выстрелов и параванов источники, как правило, буксируются за кормой судна, либо также, как и сейсмические косы, отводятся в сторону от кильватерной струи.

Таблица 5: Существующие системы 3D сейсмоакустических наблюдений на акваториях и их основные характеристики [по Thomas et al., 2012]

Система, [разработчик]	Источник, частотный диапазон	Число приемников, число трасс	Вертикальное разрешение	Площадь и глубинность исследований
<i>Ультравысокоразрешающая сейсморазведка</i>				
3D Chirp [1]	Пьезокерамический [×4] 1.5 – 13 кГц	10 @ 25 см 6 @ 25 см	менее 10 см	менее км ² 10 м
Sub-Bottom Imager [2]	Пьезокерамический [×3] 4 – 14 кГц	8 @ 40 см 5 @ 10 см	менее 10 см	менее км ² 10 м
Innomar [3]	Пьезокерамический [×3] 10 кГц	3 @ 0.5 м 1	менее 10 см	менее км ² 10 м
SEAMAP 3D [4]	Бумер 4.5 кГц	8 @ 50 см 4 @ 50 см	10 см	менее км ² 10 м
<i>Сверхвысокоразрешающая сейсморазведка</i>				
Kite [5]	Пьезокерамический / пневмопушка 1 – 5 кГц / 200 Гц	24 @ 2 м 1	0.5-2 м	несколько км ² 100 м
SEISCAT [6]	Бумер / гидропушка 0.5 – 2 кГц	12 @ 1 м 1	20 см	менее км ² 10 м
Opus 3D [6]	Бумер 2 кГц	8 @ 2 м 2 @ 2 м	20 см	менее км ² 10 м
VHR3D [7]	Спаркер 250 Дж 500 Гц	4 @ 4 м 6 @ 2 м	75 см	несколько км ² 100 м
Fugro [8]	Бумер 1 – 2 кГц	4 @ 6.25 м 16 @ 6.25 м	20 см	десятки км ² 100 м
<i>Высокоразрешающая сейсморазведка</i>				
HR3D [6]	Пневмопушка [×2] 110 Гц	2 @ 25 м 24 @ 6 м	3.5 м	десятки км ² 100 м
Университет Лозанны [9]	Пневмопушка 300 Гц	3 @ 7.5 м 24 @ 2.5 м	1.2 м	несколько км ² 100 м
P-Cable 3D [10]	Пневмопушки 125 Гц	12-24 @ 12.5 м 8-48 @ 3.125 м	4 м	десятки км ² 100 м
Gardline [11]	Пневмопушки 125 Гц	2-4 @ 12.5-25 м 192 @ 6.25-12.5 м	4 м	десятки км ² 100 м
BP [12]	Пневмопушки [×2] 20 – 400 Гц	2-4 @ 12.5 – 25 м 96-192 @ 6.25 м	1.5 м	десятки км ² 300 – 700 м

Разработчики: [1] Национальный океанографический центр, Саутгемптон (Великобритания) [Bull et al., 2005], [2] Rangeo Subsea, Сент-Джонс (Канада) [Dinn, 2012], [3] Innomar (Германия) [Lowag et al., 2010], [4] Университет имени Христиана Альбрехта, Киль (Германия) [Müller et al., 2009], [5] Лаборатория геоакустики университета Майами (США) при участии университета Пай Чай, Тэджон (Республика Корея) [Rogers et al., 1993], [6] Центр по морской геологии университета Гента (Бельгия) [Henriet et al., 1992; Missiaen et al., 2002], [7] Французский научно-исследовательский институт по эксплуатации морских ресурсов (IFREMER), Плузане (Франция) [Marsset et al., 2002; Thomas et al., 2004], [8] Fugro, Лейдсендам (Нидерланды, [9] Университет Лозанны (Швейцария) [Scheidhauer et al., 2005], [10] Университет Осло (Норвегия) [Planke et al., 2009; Lippus, 2014], [11] Gardline Marine Sciences, Норфолк (Великобритания) [Games, Wakefield, 2014], [12] BP [Hill et al., 2015].

2.2. Анализ систем с фиксированным приемоизлучающим массивом

Система “3D Chirp”

Система 3D Chirp, разработанная в Национальном Океанографическом центре Саутгемптона (Великобритания), представляет собой жесткую решетку (Рис. 2.2), размером 2×2.5 метра, в центре которой закреплены 4 пьезокерамических источника, смонтированных в форме мальтийского креста. Помимо этого, авторы разработки предлагают также располагать их в форме квадрата или двух независимых пар в зависимости от решаемых задач. Источники генерируют ЛЧМ-сигнал, форму которого можно задать со станции сбора данных, в частотном диапазоне от 1.5 до 13 кГц. Вокруг источника установлено 60 групп приемников (по 4 гидрофона в группе) на расстоянии 25 см друг от друга. Регистрация осуществляется 60-канальной сейсмической станцией. В связи с необходимостью высокоточной привязки на углах рамы установлено 4 DGPS-приемника, что позволяет достичь среднеквадратичной точности не менее 2.6 см по вертикали и 2 см по горизонтали. Оптимальная скорость буксировки системы составляет 2 узла [Bull et al., 2005; Gutowski et al., 2008].

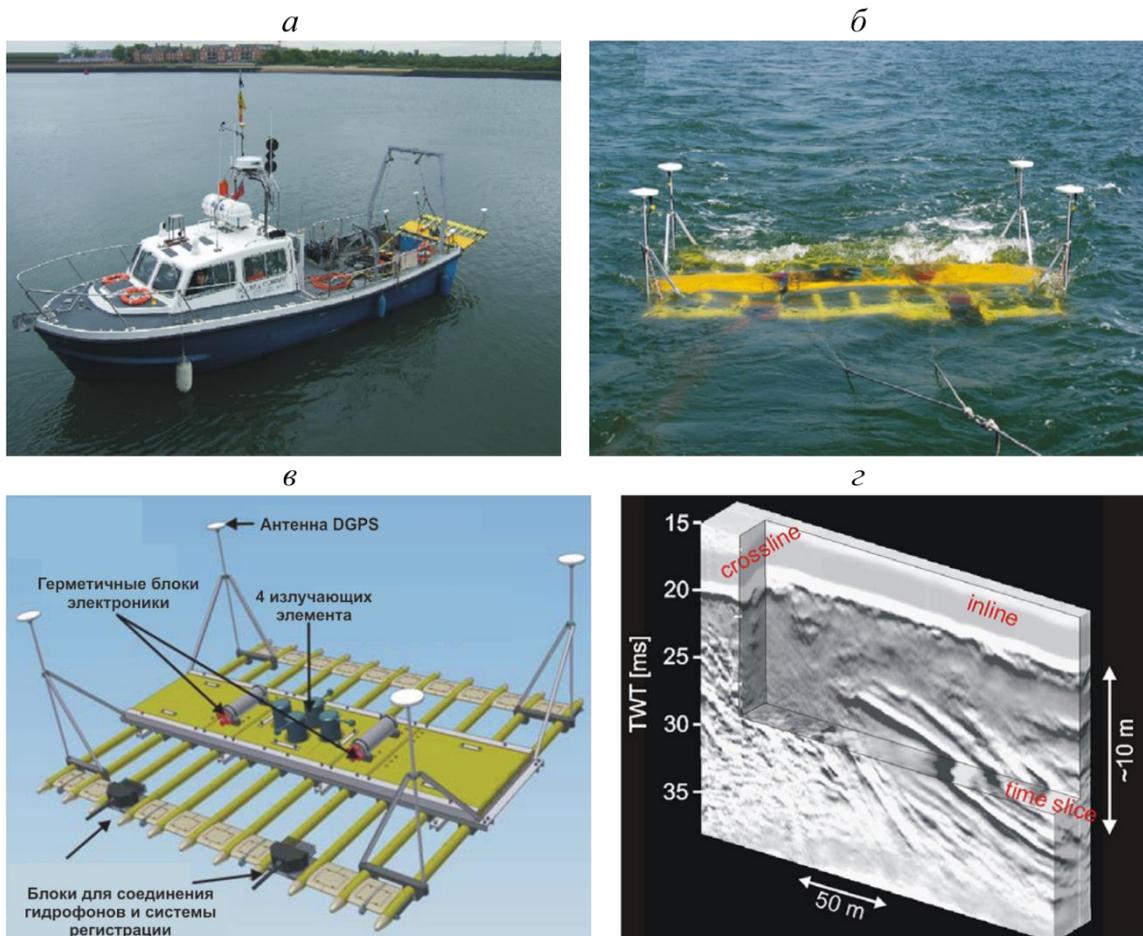


Рис. 2.2: Спуск приемоизлучающей системы в воду (а), положение системы во время проведения съемки (б), схема устройства (в) и пример полученных данных (г) [по Gutowski et al., 2008]

Система 3D Chirp использовалась для решения различных задач – поиска погребенного кессона в порту Саутгемптона [Gutowski et al., 2008] (Рис. 2.2, г); картирования кровли коренных пород и потенциально опасных объектов в толще современных отложений в портовых условиях [Vardy et al., 2008]; для получения сейсмического изображения и картирования оползневых тел и мутьевых отложений [Vardy et al., 2010], а также для решения археологических задач [Plets et al., 2009; Vardy et al., 2011]. Полученные сейсмические кубы имеют размер бина 0.125×0.125 или 0.25×0.25 метра при средней кратности 15. Максимальная площадь проведенных исследований – 100×400 метров.

В настоящее время дальнейшими разработками системы и продажей серийных устройств под брендом “GEOCHIRP 3D” занимается компания Kongsberg Geoacoustics. Для повышения точности определения положения приемоизлучающего массива в пространстве система оснащается гироскопом и датчиком динамических перемещений.

Благодаря жесткой конструкции и высокоточным навигационным датчикам обеспечивается высокая точность относительного позиционирования каждого элемента системы и возможно точное заглубление гидрофонов на нужную глубину, что в совокупности с высокой плотностью установки приемных групп позволяет получать сейсмические кубы с очень высоким разрешением. Однако вследствие небольшой ширины покрытия (менее 1.5 метров) съемка должна проводиться с межпрофильным расстоянием 1-2 метра и при благоприятных гидрометеорологических условиях. Это ограничивает суточную производительность до 0.1-0.2 км². Это значительно ограничивает спектр решаемых задач в составе инженерно-геологических изысканий и делает систему рентабельной только для решения локальных задач.

Система “Sub-Bottom Imager”

Еще одна высокоразрешающая система – Sub-Bottom Imager – сконструирована компанией PanGeo Subsea. В качестве источника упругих колебаний используется 3 высокочастотных ЛЧМ излучателя с полосой частот от 4 до 16 кГц, а приемные гидрофоны (возможны конфигурации с 24, 40 и 56 приемными элементами) располагаются перпендикулярно направлению съемки, что позволяет получить данные о строении геологической среды в полосе до 5 метров. Для получения информации о пространственном положении приемоизлучающего массива используется высокоточный инерциальный навигационный модуль. Система спроектирована для установки на телеуправляемый необитаемый подводный аппарат рабочего класса (ТНПА) или автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА) достаточной грузоподъемности (Рис. 2.3), однако также может быть смонтирована на корпус научно-исследовательского судна. При работе с ТНПА скорость съемки может достигать 2 узлов при глубине воды до 1000 метров, а превышение над дном во время регистрации данных должно составлять порядка 3.5 метров [Dinn, 2012].



Рис. 2.3: Внешний вид системы Sub-Bottom Imager для установки на телеуправляемый подводный аппарат рабочего класса [по Dinn, 2012]

Sub-Bottom Imager обладает такими же преимуществами, как и описанная выше система 3D Chirp. Однако особенностью обработки получаемых акустических данных является применение алгоритмов фокусировки изображения и синтетической апертуры, что позволяет достигнуть дециметровой разрешающей способности во всех направлениях (размер бина – 10 см) и корректно учесть наклон приемоизлучающего массива, возникающий при движении судна или ТНПА. Поскольку обработка и анализ получаемых данных происходит в реальном времени, то используются высокопроизводительные рабочие станции.

Высокое разрешение, небольшая глубинность исследований и ограниченная ширина покрытия (5 метров) системы определяют круг решаемых задач – идентификация мелкозалегающих объектов (валуны, кабели, трубопроводы, неразорвавшиеся боеприпасы и так далее) и потенциально опасных геологических явлений, инженерно-геологические изыскания линейных объектов, высокоразрешающая стратиграфия [Dinn, 2012] (Рис. 2.4). Главными недостатками можно считать высокую стоимость и сложность масштабирования системы, необходимость применения дополнительных технических средств. Несмотря на это, суточная производительность достигает 0.6 км^2 , что является хорошим показателем для подобных систем.

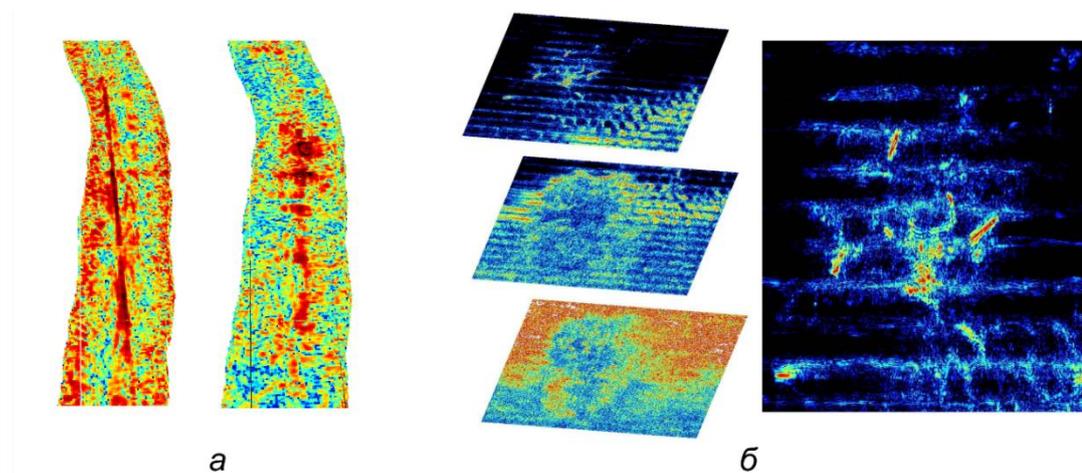


Рис. 2.4: Пример данных, полученных при инспекции подводного трубопровода (а) и при изучении археологического объекта (б) [по Dinn, 2012]

Система компании Innomar

В работе [Lowag et al., 2010] описывается трехмерная приемоизлучающая система, разработанная компанией Innomar (Германия), в которой в качестве приемоизлучающих элементов используются три профилографа SES-2000 (Рис. 2.5, а). Использование нелинейных сигналов дает возможность сформировать импульс с узкой диаграммой направленности, что в совокупности с высоким разрешением и высокой периодичностью возбуждения импульса позволяет получать детальное изображение верхней части донных осадков. Приемоизлучающие антенны располагаются на расстоянии 50 см друг от друга на специальной штанге, закрепленной к борту судна. Для адаптации к условиям съемки расстояние между ними может быть увеличено.

Авторами приводится два реальных примера использования системы. В первом случае для решения археологических задач было получено 40 профилей на площади 130 x 40 метров. При дальнейшей обработке был получен сейсмический куб с размером бина 0.33 x 0.33 метра и вертикальной разрешающей способностью 2 см (частота излучения 10 кГц) (Рис. 2.5, б-в). Во втором случае съемка проводилась перед началом дноуглубительных работ в подходном канале порта, расположенного в северной Германии. Размер бина был равен 0.5 x 0.5 метра.

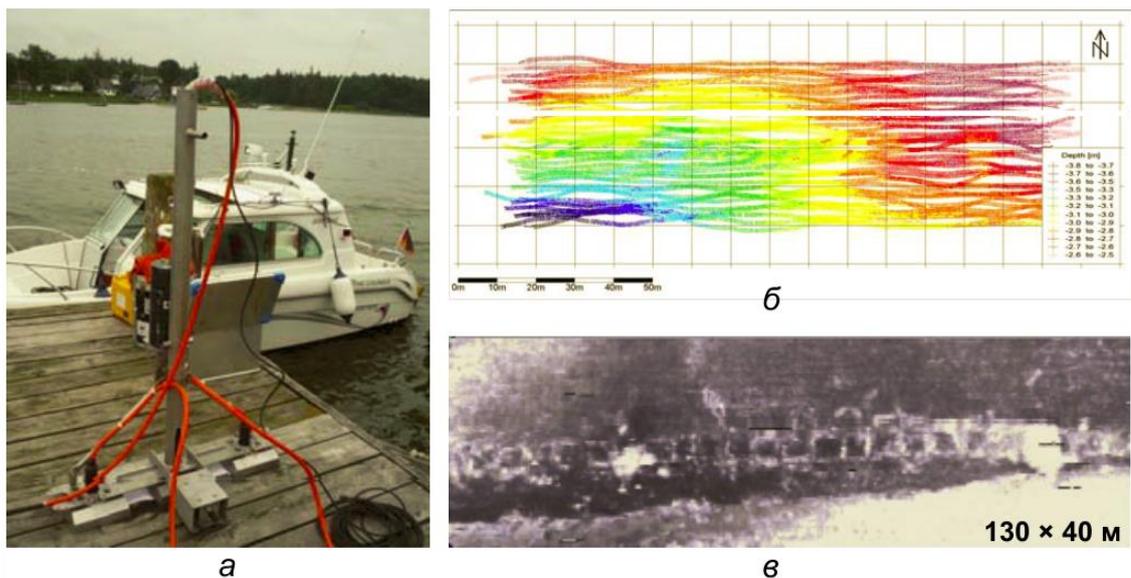


Рис. 2.5: Внешний вид приемоизлучающей системы Innomar (а), схема профилей съемки (б) и временной срезу полученного сейсмического куба (в) [по Lowag et al., 2010]

К недостаткам системы можно отнести жесткое крепление штанги к корпусу судна, что повышает уровень акустических помех и требует обязательного применения датчика динамических перемещений, а добавление дополнительных приемоизлучающих антенн также приведет к значительному росту себестоимости работ. Ширина покрытия составляет 0.75 метра, вследствие чего затрудняется судовождение и сложно добиться равномерной кратности, а суточная производительность не превышает 0.1 км². В связи с этим система компании Innomar может использоваться только для детального изучения площадок небольших размеров.

Система “SEAMAP-3D”

Система SEAMAP-3D была разработана в университете имени Христиана Альбрехта (Киль, Германия). Она основана на самоходном катамаране небольшого размера, который буксирует приемоизлучающую систему (Рис. 2.6). Для снижения уровня шумов используются маломощные электродвигатели. Приемная система представляет собой жесткую решетку 8×4 элементов с шагом 0.5 метра, в узлах которой закреплены единичные гидрофоны. Регистрация данных осуществляется с использованием 32-канальной сейсмической станции на базе 24-битного АЦП. В качестве источника упругих колебаний используется излучатель типа «бумер» с полосой частот от 100 Гц до 6 кГц, возбуждающий импульс три раза в секунду. Позиционирование системы осуществляется DGPS-приемником, работающим в режиме кинематики в реальном времени (RTK). Для повышения надежности позиционирования его антенна установлена непосредственно над источником, а для определения курса и ориентировки приемного массива дополнительно установлены цифровые компасы, что позволяет определять координаты источника с точностью 2-5 см, а положение приемных элементов с точностью 10-20 см на расстоянии 2 метров от антенны DGPS [Müller et al., 2009].

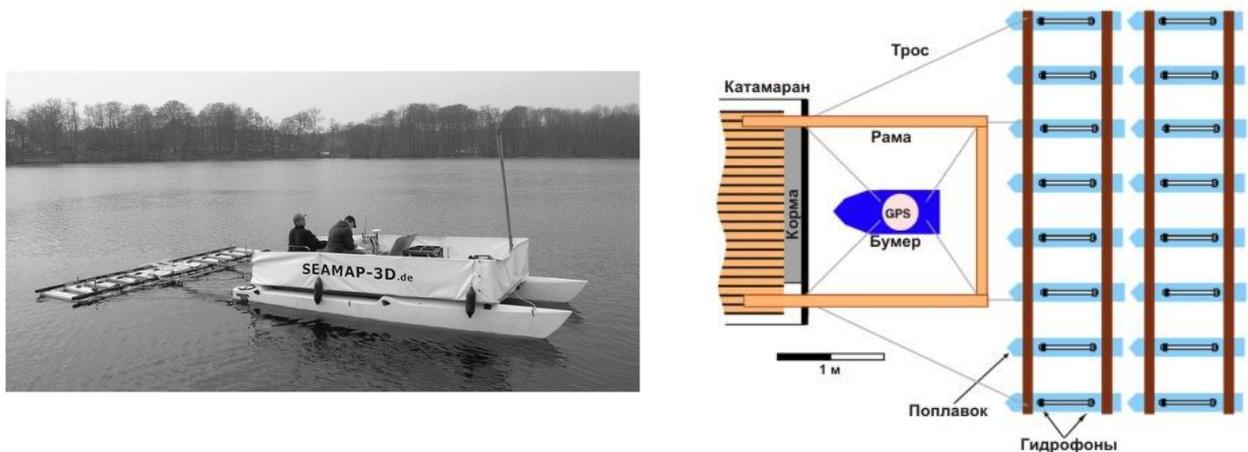


Рис. 2.6: Внешний вид (слева) и схема (справа) системы SEAMAP-3D [по Müller et al., 2009]

Основное применение системы SEAMAP-3D – детальное изучение археологических объектов на мелководных акваториях. Авторы методики успешно выполнили несколько проектов на различных площадках в Германии и Турции [Müller et al., 2009; Müller et al., 2013] (Рис. 2.7). Было получено несколько сейсмических кубов площадью порядка 100×150 метров с размером бина 0.25×0.25 метра.

Преимуществом системы является возможность масштабирования путем добавления дополнительных приемных элементов, однако в условиях открытых акваторий использование системы ограничено в связи с возможной деформацией конструкции при волновом воздействии. Использование излучателя типа «бумер» позволяет достигнуть редкого пространственного шага между пунктами возбуждения, за счет чего повышается кратность наблюдений и достигается

высокое разрешение как по горизонтали, так и по вертикали. Компактное расположение элементов приемоизлучающего массива позволяет работать на акваториях с глубиной воды более 1-2 метров, но из-за небольшой ширины покрытия (2 метра) межпрофильное расстояние не должно превышать 2 метров и производительность может достигать 0.1 – 0.25 км²/сутки.

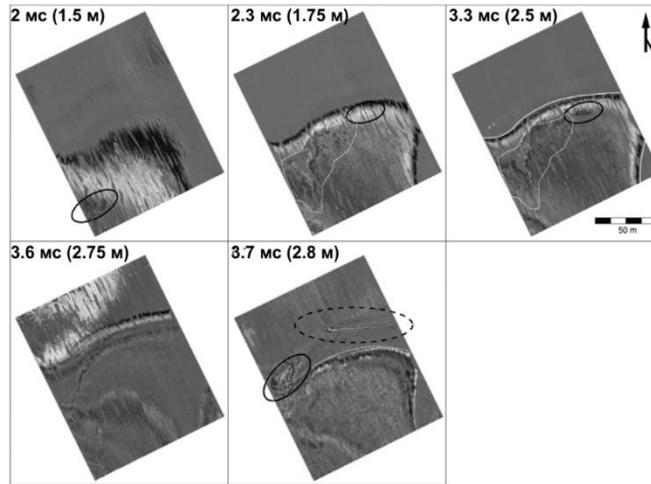


Рис. 2.7: Временные срезы сейсмического куба, полученного системой SEAMAP-3D при съемке археологических объектов в Турции [по Müller et al., 2013]

Система “Kite”

Одна из первых приемоизлучающих систем для проведения трехмерных сейсмоакустических наблюдений – “Kite” (Рис. 2.8) – была разработана в лаборатории геоакустики университета Майами (США) при участии университета Пай Чай (Тэджон, Республика Корея). Для регистрации упругих колебаний используется 24 гидрофона, расположенных на жесткой раме через 2 метра в направлении, поперечном движению судна, а для оцифровки сигнала используется 12-битное АЦП. В качестве источника упругих колебаний применяется либо широкополосная пневматическая пушка с центральной частотой около 200 Гц, либо пьезокерамический источник с полосой частот от 1 до 5 кГц, излучающий сигнал в псевдослучайном коде для увеличения отношения сигнал/шум. Скорость судна во время проведения опытно-методических работ варьировалась от 2 до 5 узлов, а географическая привязка осуществлялась с использованием DGPS-приемника.

Система была разработана преимущественно для проведения региональных исследований на континентальном шельфе и ее испытания происходили на восточном побережье Северной Америки [Rogers et al., 1993]. О дальнейшем использовании системы не известно, что может быть следствием ее недостатков – жесткая конструкция с большими линейными размерами требует привлечения специализированного судна с грузоподъемными механизмами, а максимальное удаление, равное 46 метрам (Рис. 2.8), не позволяет проводить работы на глубинах менее 15-20 метров. В то же время система характеризуется хорошей производительностью – 3-4 км²/сутки.

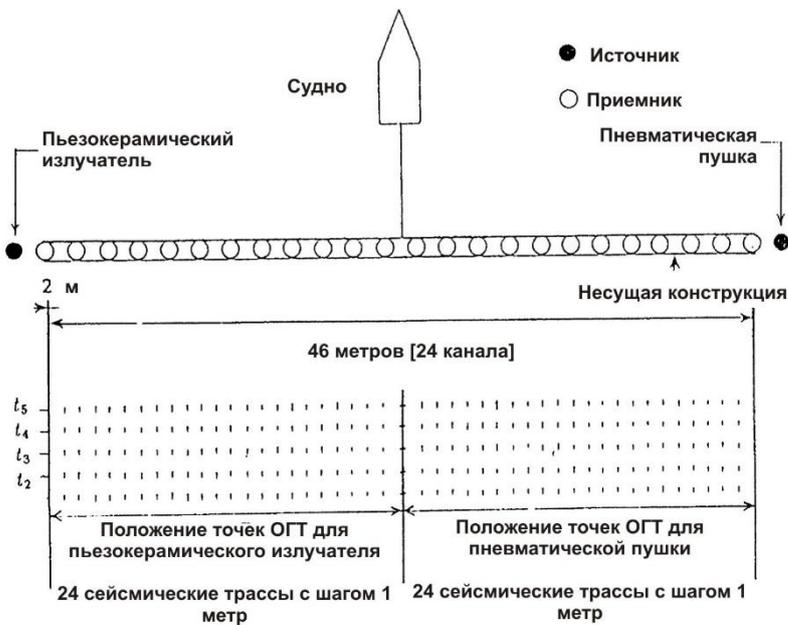


Рис. 2.8: Схема системы "Kite" [по Rogers et al., 1993]

Система "SEISCAT"

В начале 90-х годов XX века разработки трехмерных систем для высокоразрешающих наблюдений начались в университете Гента (Бельгия). В рамках нескольких международных научно-исследовательских проектов была разработана система SEISCAT (Рис. 2.9). Приемная часть состоит из 12 одноканальных кос, которые установлены через 1 метр на легком катамаране, буксируемом судном. В качестве источника используется гидропушка объемом 15 дм³ или излучатель типа "бумер", обеспечивающих излучение сигнала в полосе до 2 кГц с центральной частотой около 1000 Гц. Для навигации по линии профиля использовался автоматический лазерный теодолит, установленный на берегу, и отражающая призма, установленная на буксируемой части. Координаты, определенные с точностью до нескольких сантиметров, передавались на борт по радиоканалу в реальном времени [Henriet et al., 1992].

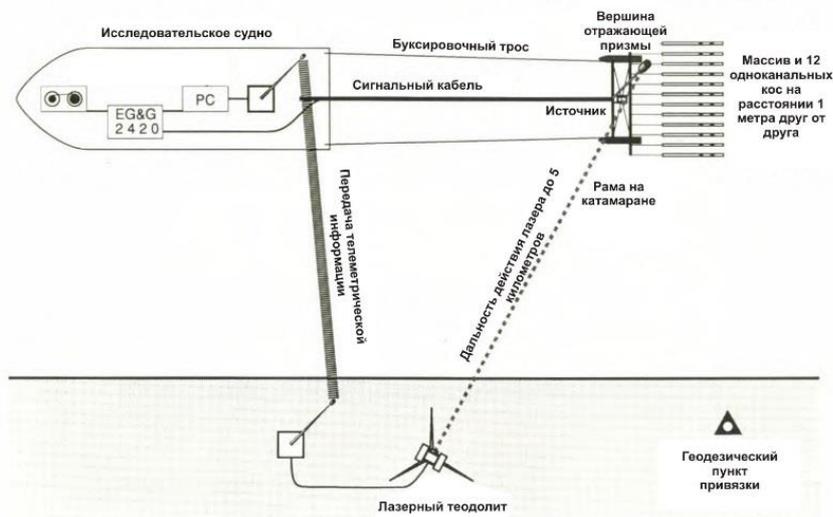


Рис. 2.9: Схема системы SEISCAT [по Henriet et al., 1992]

Апробация системы проводилась на реке Шельда, где был получен сейсмический куб площадью 50×180 метров с размером бина 1×1 метр и средней кратностью 5 для изучения глиняного диапира диаметром около 60 метров [Henriet et al., 1992; Versteeg et al., 1992].

Система SEISCAT имеет схожие преимущества и недостатки с системой SEAMAP-3D. Стоит отметить, что выбранная система навигации допустима лишь при работе в непосредственной близости от берега. Увеличенное количество приемных элементов и расстояние между ними позволяет за один проход судна по профилю получить данные в полосе 6 метров, а суточная производительность может достигать 0.75 км^2 .

Система “Opus3D”

Дальнейшим развитием методики SEISCAT стало создание системы Opus3D, приемный массив которой составлен из 8 двухканальных сейсмических кос. Расстояние между каналами и между косами одинаково и равно 2 м. Каждый канал в свою очередь содержит два гидрофона на расстоянии 25 см. Для буксировки используются специально разработанные надувные модули, закрепленные на лодке, которая также является носителем источника (Рис. 2.10, Рис. 2.11). В качестве источника используется излучатель типа "бумер" с центральной частотой около 2 кГц и полосой частот от 1 до 3 кГц. Позиционирование осуществляется с использованием DGPS-приемников, работающих в режиме кинематики в реальном времени (RTK). Система может использоваться как самостоятельно – в этом случае лодка является носителем, так и в буксируемом варианте [Missiaen et al., 2002]. Испытания системы также проводились в речных условиях над глиняным диапиром и был получен сейсмический куб площадью 50×150 метров с размером бина 1×1 метр. Глубинность исследований составила порядка 50 метров ниже уровня дна [Missiaen, 2005; Missiaen, 2008].



Рис. 2.10: Внешний вид системы Opus3D [Missiaen, 2005]

В системе были учтены недостатки предыдущих экспериментов и в результате приемоизлучающий массив более приспособлен к проведению исследований в морских

условиях, так как надувные модули могут перемещаться в вертикальной плоскости и компенсировать смещения, вызываемые волнами. Однако модули также являются ограничивающим фактором для масштабирования систем в связи с возможными деформациями при буксировке. В описанной конфигурации ширина полосы покрытия составляет 8 метров, что позволяет получать за одни сутки данные на площади от 1 до 1.5 км².

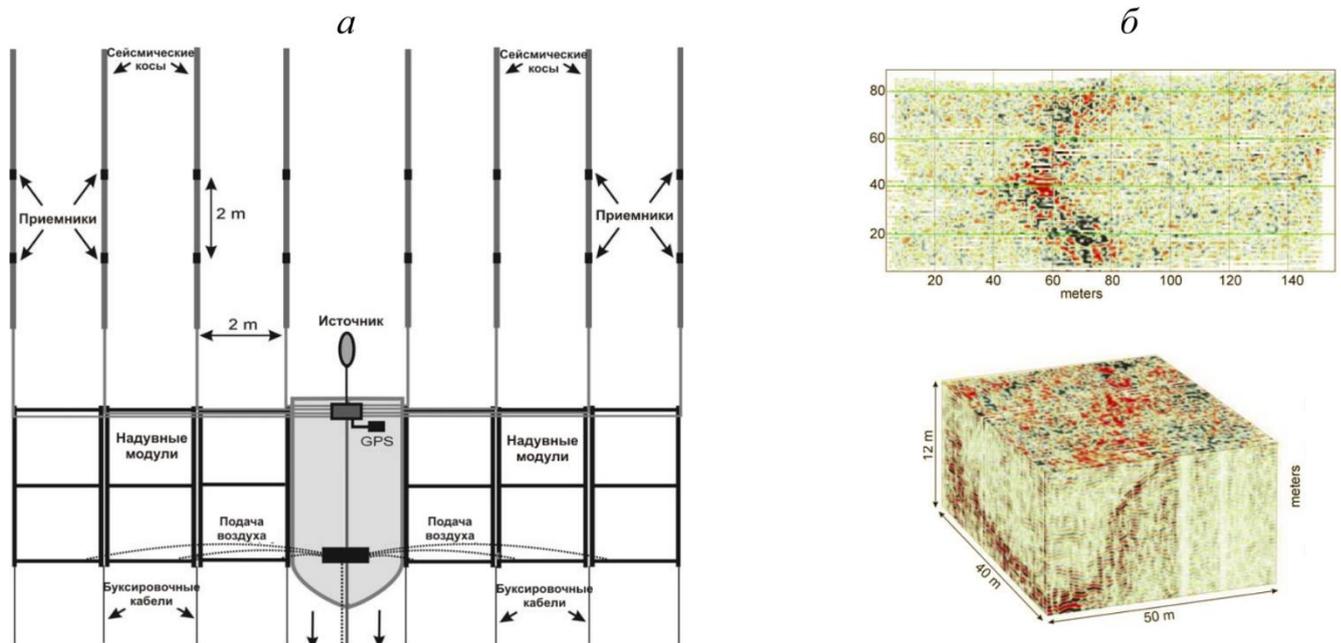


Рис. 2.11: Схема системы Orpus3D (а) и пример полученных данных (б) [по Missiaen, 2005]

Аналогичный сейсмоакустический комплекс, состоящий из 8 двухканальных кос, разрабатывался в начале 2000-х годов в государственном научном центре Южморгеология (Геленджик, Россия), и получил название Аквасвип-3Д. В качестве источника предлагалось использовать пьезокерамический излучатель. Буксировка приемных элементов должна была осуществляться с использованием несамоходного катамарана [по материалам Когана Л.И.]. В литературных источниках информации о реальном использовании комплекса и полученных результатах обнаружить не удалось.

2.3. Анализ систем, буксируемых на выстрелах

Системы “HR3D” и “VHR3D”

Во Французском научно-исследовательском институте по эксплуатации морских ресурсов (IFREMER) (Плузане, Франция) в начале 2000-х годов были разработаны системы HR3D и VHR3D, предназначенные для получения сейсмического изображения геологической среды с вертикальным разрешением 1 метр и проведения инженерных изысканий на небольших площадях с глубинами моря до 100 метров. В статьях [Marsset et al., 2002; Marsset et al., 2004; Thomas et al., 2004] описаны различные конфигурации данной системы. Для достижения заданной разрешающей способности и частотного состава записи в качестве источника

предлагается использовать излучатели типа "спаркер", либо пневматические пушки Mini G.I. Навигация и определении координат осуществляется при помощи DGPS-приемников, установленных на судне и на источнике, а для повышения точности позиционирования сейсмических кос применяются цифровые компасы.

В статье [Marsset et al., 2002] представлены результаты применения системы для изучения осадков с высоким контрастом литологических свойств, разломной зоны, а также изучения неконсолидированных секвенций песка и глины в речных отложениях. Для возбуждения упругих колебаний использовался источник типа «спаркер» с центральной частотой 600 Гц. Для регистрации использовались 4 6-канальные сейсмические косы (шаг 1 метр между каналами), которые буксировались на расстоянии 4 метров друг от друга (Рис. 2.12).

На площадке возле острова Корсика (Средиземное море) использовалась конфигурация системы с одной сейсмической косой (48 каналов, расстояние между каналами 6.25 метра) и двумя излучателями типа "спаркер", разнесенных на 15 метров друг от друга. В Норвежском море для получения сейсмического куба использовалось две сейсмические косы (48 каналов, расстояние между каналами 6.25 метра), разнесенные на 25 метров, и две пневматические пушки типа Mini G.I., разнесенные на 12.5 метров (Рис. 2.12) [Thomas et al., 2004].

Аналогичная система применялась для изучения мелкомасштабных сложно построенных осадков на шельфе Адриатического шельфа [Marsset et al., 2004] (Рис. 2.13). Во время проведения этих исследований также использовалась конфигурация с 4 косами, описанная выше.

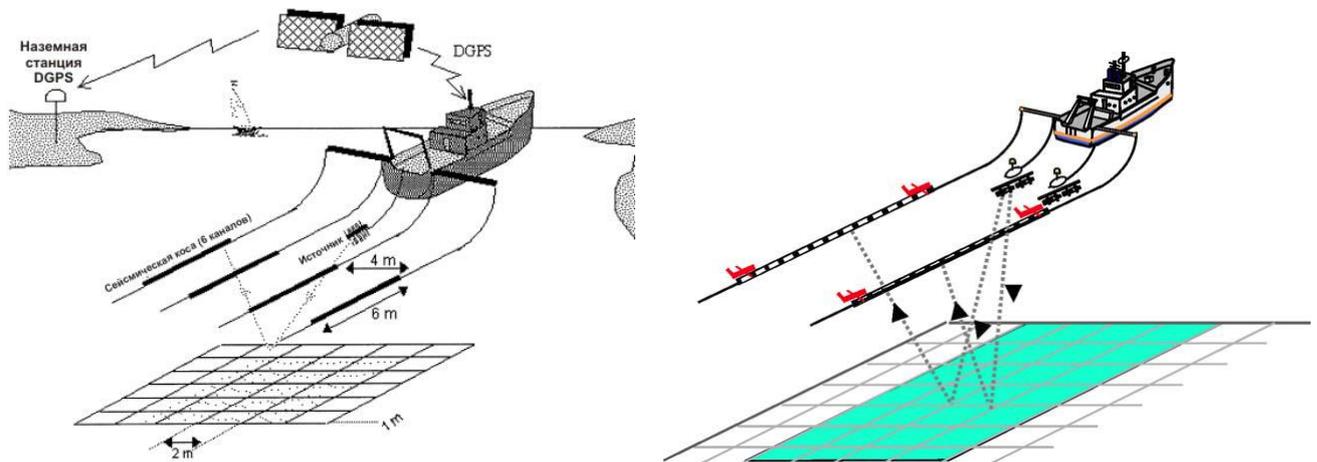


Рис. 2.12: Схема системы института IFREMER [по Marsset et al., 2002; Thomas et al., 2004]

Использование стандартного оборудования позволило разработчикам системы снизить экономические затраты, а выстрелы позволяют смонтировать ее практически на любом судне. В то же время близкое расположение элементов приемоизлучающего массива к судну повышает уровень акустических помех, а полоса покрытия зависит от ширины судна и выстрелов. Вследствие этого система имеет ограниченные возможности для масштабирования, а более тесное расположение многоканальных сейсмических кос затруднительно в связи с опасностью

их запутывания. Негативным моментом также является невозможность точного определения координат всех элементов приемоизлучающего массива. Использование двух источников позволило увеличить ширину покрытия и уменьшить интервал возбуждения. В различных конфигурациях производительность системы варьируется от 1 до 3.5 км², но при этом размер бина больше (от 2 до 6.25 м), чем у рассмотренных выше систем с фиксированным приемоизлучающим массивом, и ширина покрытия может достигать 25 метров. Использование сейсмических кос с большим числом каналов приводит к уменьшению эффективности системы при работе на мелководных акваториях, поскольку дальние удаления не участвуют в формировании сейсмического изображения верхней части донных отложений.

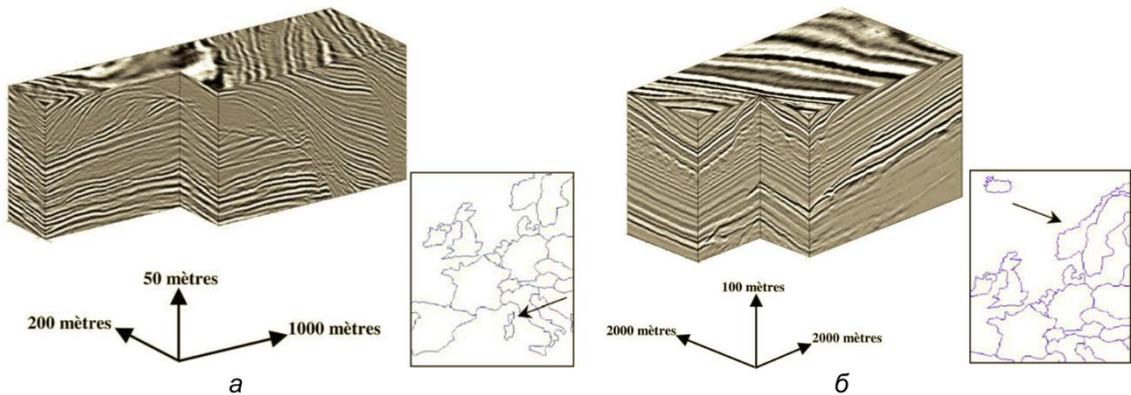


Рис. 2.13: Пример сейсмических кубов, полученных институтом IFREMER возле о. Корсика (а) и в Норвежском море (б) [по Thomas et al., 2004]

Система университета Лозанны

В эти же годы в университете Лозанны (Швейцария) проводились работы по созданию методики высокоразрешающих трехмерных сейсмических наблюдений в озерных условиях. В качестве приемной системы используются 3 твердотельные 24-канальные сейсмические косы (шаг 2.5 метра между каналами) с концевыми буйами для стабилизации во время буксировки и сейсмическая станция на базе 24-разрядного АЦП. Одна из кос буксировалась непосредственно за судном, две остальные – на боковых выстрелах длиной 5-7.5 метров (Рис. 2.14, Рис. 2.15). Для стабильности заглубления кос на концах выстрелов были закреплены небольшие плоты. Возбуждение упругих колебаний осуществлялось при помощи пневматической пушки Mini G.I. с системой подавления вторичных пульсаций воздушной полости. Центральная частота сигнала в описанном эксперименте составляла 330 Гц при полосе частот от 40 до 650 Гц. Позиционирование всей системы осуществлялось при помощи DGPS-приемников, работавших в режиме кинематики реального времени, антенны которых были установлены на судне и вблизи хвостовой части кос, что позволило определить координаты всех элементов приемоизлучающей системы с точностью ± 0.05 метра. Возбуждение сигнала происходило с равным шагом по пространству по команде с системы навигации. При скорости судна в 2 узла и частоте обновления

данных навигации 5 Гц удалось достичь точности 0.25 метра при определении координат пункта возбуждения сигнала [Scheidhauer et al., 2005].

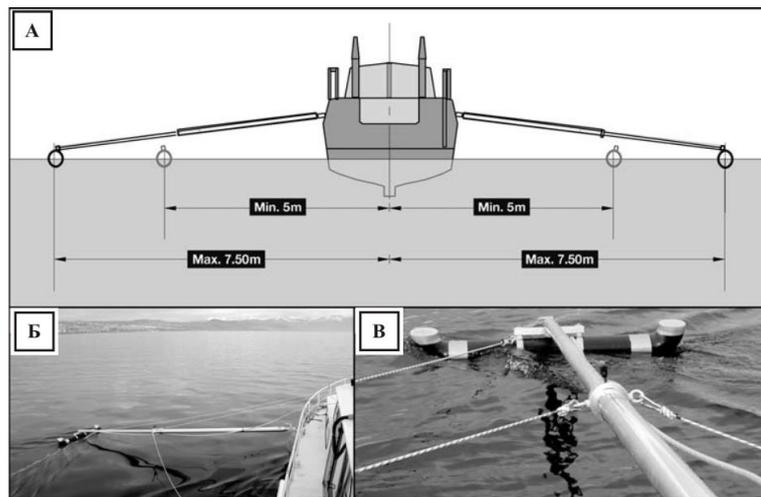


Рис. 2.14: (А) Схематический разрез судна с выстрелами для буксировки кос; (Б) оголовье косы закреплено на плоте, поддерживающем выстрелы; (В) положение выстрелов регулируется веревками [Scheidhauer et al., 2005]

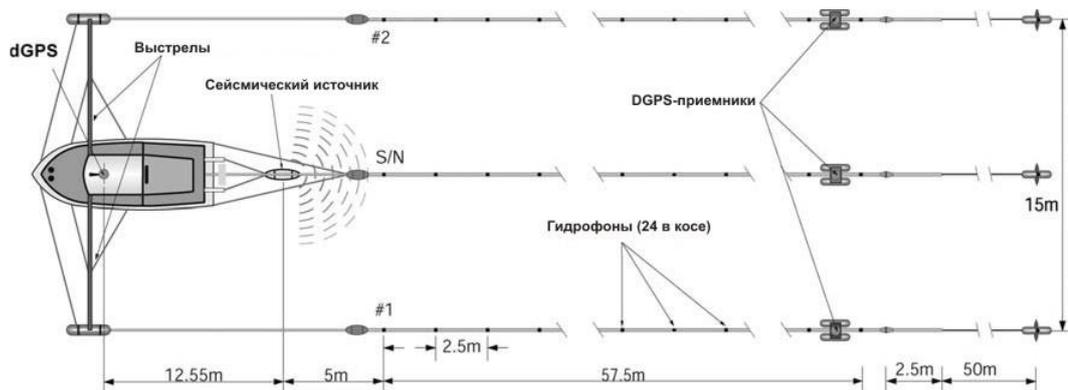


Рис. 2.15: Схема системы с тремя косами для проведения высокоразрешающих трехмерных наблюдений на озерах [по Scheidhauer et al., 2005]

Система была успешно испытана в Женевском озере, где коллективом авторов [Scheidhauer et al., 2005] проводилось изучение сложнопостроенной разломной зоны. В результате проведенных исследований был получен сейсмический куб площадью 600×1500 метров с размером бина 3.75×1.25 метра и номинальной кратностью 6. Максимальная глубинность, достигнутая при проведении полевых работ, составила 300 м ниже поверхности дна (Рис. 2.16).

Основным недостатком системы является небольшое количество сейсмических кос и, вследствие этого, ограниченная ширина покрытия (11.25 метров) и производительность ($0.75 - 1.5 \text{ км}^2/\text{сутки}$). Увеличение количества сейсмических кос приведет к необходимости удлинения выстрелов и усложнит спускоподъемные операции.

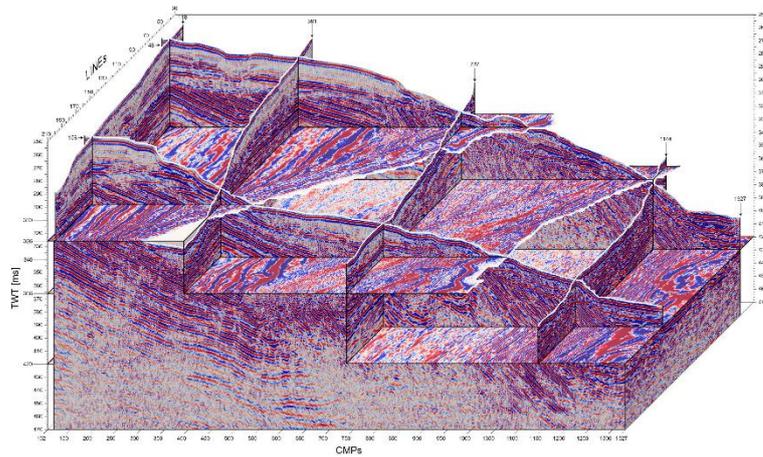


Рис. 2.16: Пример данных, полученных с использованием системы университета Лозанны [по Scheidhauer et al., 2005]

2.4. Анализ систем, буксируемых при помощи параванов

Системы на основе оборудования для проведения разведочной 3Д сейсморазведки

Поскольку этот способ, как отмечалось выше, является стандартным для проведения разведочной трехмерной сейсморазведки, то первые высокоразрешающие наблюдения начали проводить, адаптируя имеющееся оборудование к новым задачам. Одна из первых подобных методик была опробована компанией Total в Северном море [des Vallieres et al., 1996]. Для достижения необходимой пространственной разрешающей способности расстояние между косами, их длина и количество было уменьшено. Затем похожие технологии использовались компаниями Shell, Vastar и BP в акватории Мексиканского залива [Hill et al., 2015].

В 2004 году в акватории Каспийского моря по заказу компании BP проводились комплексные инженерные изыскания и в их состав входила трехмерная высокоразрешающая сейсморазведка. Приемозлучающая система состояла из 4 сейсмических кос и 2 групп пневматических источников. В 2013 году подобные исследования проводились на месторождении Азери-Чираг-Гюнешли (Азербайджан, Каспийское море) с применением 6 сейсмических кос и двух групп источников [Hill et al., 2015].

В 2013 году компания также проводила сверхвысокоразрешающие сейсмические наблюдения в Норвежском море с целью получения детального изображения верхней части разреза (300 метров ниже уровня дна) при глубине воды порядка 70 метров. При проведении съемки использовались 2 сейсмические косы (шаг между каналами 6.25 метров) с расстоянием 25 метров между ними и два источника на расстоянии 12.5 метров. В результате был получен сейсмический куб с размером бина 3.125×6.25 метра, что позволило идентифицировать палеоканалы шириной менее 50 метров, а также выделить слои внутри них и восстановить историю движения ледников в районе исследований [Hill et al., 2015].

Аналогичные исследования проводились в 2014 году в английском секторе центральной части Северного моря. Отличие в методике состояло в увеличенном шаге между каналами (12.5 метров) и длине косы (1200 метров). В совокупности с данными профильных высокоразрешающих наблюдений это позволило идентифицировать опасные инженерно-геологические явления и процессы до глубины 750 метров ниже уровня дна [Hill et al., 2015].

Помимо описанных выше методик существуют разработки коммерческих компаний, занимающихся проведением инженерно-геологических изысканий. Однако получение актуальной информации затруднено в связи с защитой ими своих коммерческих интересов. Из открытых источников известно, например, что компания Fugro проводила изыскания с применением четырех 16-канальных сейсмических кос длиной 50 метров, буксировавшихся на расстоянии 6.25 метров друг от друга. В качестве источника применялась группа излучателей типа «бумер».

Компания Gardline при проведении инженерно-геологических изысканий использует систему трехмерных высокоразрешающих сейсмических наблюдений, построенную на базе четырех сейсмических кос длиной 600 метров с расстоянием между ними, равным 12.5 метров, либо двух кос длиной 1200 метров и расстоянием 25 метров между ними. В качестве источника используется одна или две группы пневматических пушек небольшого объема [Games, Wakefield, 2014].

Главным фактором, ограничивающим использование всех подобных систем на мелководных акваториях, является длина сейсмических кос. Размер бина также является недостаточным для идентификации опасных инженерно-геологических явлений и процессов размером менее нескольких метров. Производительность всех описанных выше систем составляет порядка $1.75 - 3.5 \text{ км}^2/\text{сутки}$.

Система “P-Cable 3D”

Отдельного рассмотрения требует система P-Cable 3D, которая была разработана компанией Volcanic Basin Petroleum Research при участии университета Тромсе (Норвегия) и Национального Океанографического центра Саутгемптона (Великобритания) в рамках программы HERMES по изучению высокотемпературных экосистем активных окраин европейских [Planke et al., 2009]. Дальнейшее испытание системы происходило при участии института IFM-Geomar (Киль, Германия) и коммерческих партнеров. В настоящее время система активно развивается при участии производителя сейсмического оборудования – Geometrics (США) [Ebuna et al., 2013].

Основой системы P-Cable 3D является так называемый перпендикулярный кабель, буксируемый за судном. Кабель растягивается двумя параванами и к нему подключается от 12 до 24 сейсмических кос (Рис. 2.17, Рис. 2.18). В зависимости от задач расстояние между косами

может быть равно 12.5 или 6.25 метрам. В качестве приемных элементов используются цифровые твердотельные сейсмические косы. В стандартной конфигурации каждая коса содержит в себе 8 каналов с шагом 3.125 метра, однако на практике могут применяться более длинные косы – до 200 метров (64 канала). Регистрация сейсмических данных осуществляется с использованием 8-канальных цифровых модулей на базе 24-разрядных АЦП. В качестве источника используются группы пневматических пушек Mini G.I. с центральной частотой от 100 до 250 Гц и полосой частот до 1000 Гц. Также проводились работы с использованием группы излучателей типа «бумер». Positionирование системы осуществляется с использованием DGPS-приемников, закрепленными на пушке, параванах и судне [Planke et al., 2009; Ebuna et al., 2013; Lippus, 2014]. Для повышения точности определения координат приемных каналов также могут применяться цифровые компасы, установленные в оголовье и в хвостовой части сейсмических кос.

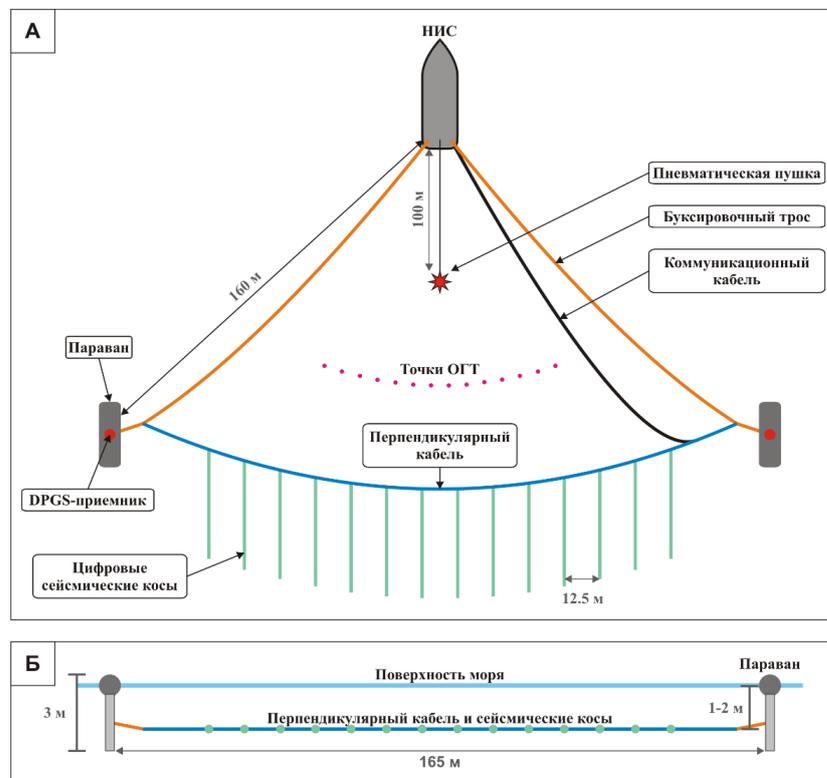


Рис. 2.17: Схема системы P-Cable: вид сверху (А) и сзади (Б)

Система P-Cable использовалась для изучения природы активных деформаций и тектонического строения залива Кадис в Атлантическом океана [Crutchley et al., 2011], для поиска потенциально опасных геологических объектов [Ebuna et al., 2013; Шматкова и др., 2015], для изучения газовых каналов, скоплений приповерхностного газа на шельфе Баренцева моря [например, Planke et al., 2010; Plaza-Faverola et al., 2011] и изучения газовых гидратов [Buenz et al., 2012]. В последние годы значительно возросло число коммерческих проектов, выполнявшихся с использованием системы P-Cable 3D, в области инженерно-геологических изысканий. Полученные кубы имеют среднюю площадь 10-50 км² [Planke et al., 2009], а

максимальная площадь исследований составляет 250 км² [Planke et al., 2010]. Стандартный размер бина равен 6.25 × 6.25 метра. При выполнении детальных работ он может быть уменьшен до 3.125 × 3.125 метра.



Рис. 2.18: Внешний вид системы P-Cable 3D во время проведения работ

Из всех описанных выше систем P-Cable 3D обладает самыми широкими возможностями для адаптации к условиям работы на акваториях с различными глубинами и позволяет решать широкий спектр задач с максимальной производительностью – от 5 до 20 км²/сутки. Преимуществами выбранного способа буксировки также являются уменьшение шумов судна за счет увеличения расстояния от судна до приемоизлучающей системы и стабильное положение приемоизлучающего массива в пространстве даже в условиях волнения моря. Однако главным недостатком является высокая цена оборудования, вследствие чего стоимость проведения съемки может превысить бюджет инженерно-геологических изысканий площадки.

2.5. Сравнительная характеристика приемоизлучающих систем

Результаты сравнения характеристик существующих методик трехмерных сейсмоакустических наблюдений на акваториях были обобщены в таблицу (Таблица 6), а графическое сравнение ширины покрытия приведено в приложении Б (Рис. Б.1). Суточная производительность, выраженная в км²/сутки, рассчитывалась по следующей формуле (26):

$$S = 1.852 \times V_{\text{ср}} \times \Delta L \times H / 1000, \quad (26)$$

где $V_{\text{ср}}$ – средняя скорость движения судна по профилю в узлах, ΔL – ширина покрытия (м), H – количество рабочих часов в сутках. Для учета времени на развороты судна и других факторов, снижающих производительность, количество рабочих часов в сутках при расчетах принималось равным 20.

Таблица 6: Сравнительная характеристика существующих методик 3D сейсмоакустических наблюдений на акваториях

Система	Размер бина, м	Ширина покрытия, м	Оптимальная скорость съемки, узлы	Производительность, км ² /сутки
<i>Системы с фиксированным приемоизлучающим массивом</i>				
3D Chirp	0.125 / 0.25	1.25	2	0.1
Sub-Bottom Imager	0.1	3	2	0.2
Innomar	0.33	0.75	4	0.1
SEAMAP 3D	0.25	2	2	0.1
Kite	1	24	4	3.6
SEISCAT	1	6	3	0.75
Opus 3D	1	8	4	1.2
<i>Системы, буксирующиеся на выстрелах</i>				
VHR3D	2	8	4	1.2
HR3D	6.25	25	4	3.7
Университет Лозанны	3.75 × 1.25	11.25	2	0.8
<i>Системы, буксирующиеся при помощи параванов</i>				
Fugro	3.125	12.5	4	1.9
Gardline	6.25	25	4	3.7
P-Cable 3D	3.125 / 6.25	37.5	4	5.6

2.6. Эксперименты МГУ имени М.В.Ломоносова в Кандалакшском заливе

Первые эксперименты по проведению трехмерных сейсмоакустических наблюдений начались на кафедре сейсмометрии и геоакустики Геологического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова в 2012 году. При непосредственном участии автора был проведен ряд экспериментов с борта НИС «Студент» в проливе Великая Салма Кандалакшского залива Белого моря, вблизи Беломорской биологической станции им. Н.А.Перцова Биологического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова (ББС МГУ) (Рис. 2.19).

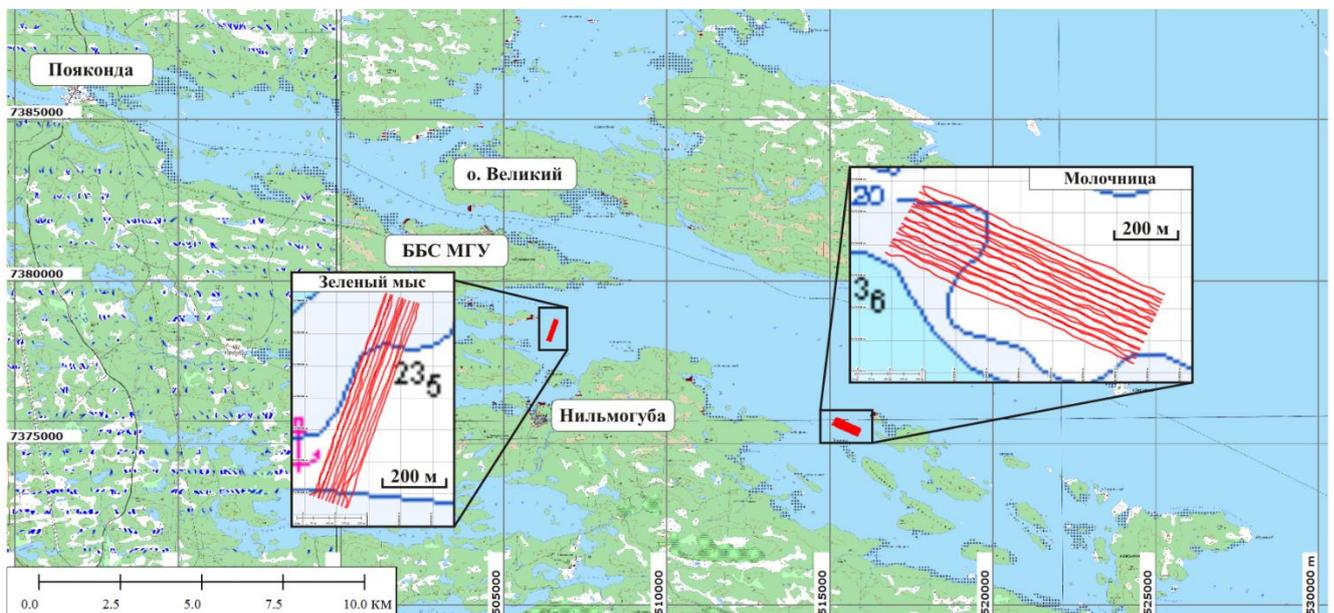


Рис. 2.19: Обзорная схема района работ и фактическая сеть профилей съемок 2012 года

Всего было проведено две трехмерные сейсмоакустические съемки – на полигоне возле Зеленого мыса и острова Молочница (Рис. 2.19, врезки).

Для возбуждения упругих колебаний применялся электроискровой излучатель типа «спаркер», представлявший собой линейную группу (длиной 1 метр) из 100 электродов. Энергия (300 Дж) на излучатель подавалась высоковольтным источником CSP-P два раза в секунду.

Регистрация сейсмоакустических данных осуществлялась с использованием четырех одноканальных аналоговых сейсмических кос, которые буксировались на расстоянии 3 метра друг от друга (Рис. 2.20), и четырехканальной сейсмической станции Геонт-Шельф (Россия). Навигация осуществлялась с использованием дифференциального ГНСС-приемника Trimble Ag132, антенна которого была установлена на корме по правому борту.

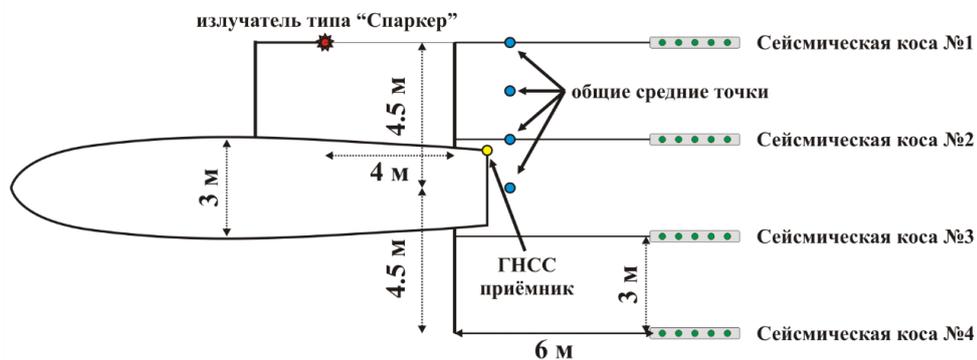


Рис. 2.20: Схема приемоизлучающего массива при проведении съемки 2012 года

Плановое расстояние между соседними профилями было выбрано равным 10 метрам, однако вследствие наличия сильных течений и плохой управляемости судна оно варьировалось на различных участках от 2 до 20 метров. На полигоне возле Зеленого мыса было выполнено 12 профилей, на полигоне у острова Молочница – 20.

Полученные сейсмоакустические данные обрабатывались в программном комплексе RadExPro Professional 2012.2 по графу, включавшему расчет и присвоение геометрии наблюдений, ввод статических поправок за аппаратурные задержки и приливно-отливные течения, полосовую фильтрацию и амплитудную коррекцию, предсказывающую и детерминистическую деконволюцию. В связи с относительно большими удалениями приемных каналов от источника было необходимо также применить кинематические поправки, для ввода которых использовались результаты скоростного анализа дополнительных профилей, выполненных с использованием 16-канальной сейсмической косы.

Анализ полученных данных показал, что из-за больших отклонений от линии профиля и ограниченного числа сейсмических кос в процессе обработки невозможно получить сейсмический куб с достаточной дискретизацией по пространственным осям, вследствие чего проведенные сейсмоакустические съемки необходимо рассматривать как плотную сеть

двухмерных профилей (2.5Д). Поэтому завершающим этапом обработки стало проведение двухмерной миграции Столта, проведенной по отдельности для каждого профиля.

Еще одним негативным фактором, оказавшем влияние на качество полученных данных, стало различие амплитудно-частотных характеристик одноканальных сейсмических кос, вызванное как неравномерным заглублением, возникавшем при боковой качке судна, так и различием в чувствительности отдельных приемных элементов (Рис. 2.21).

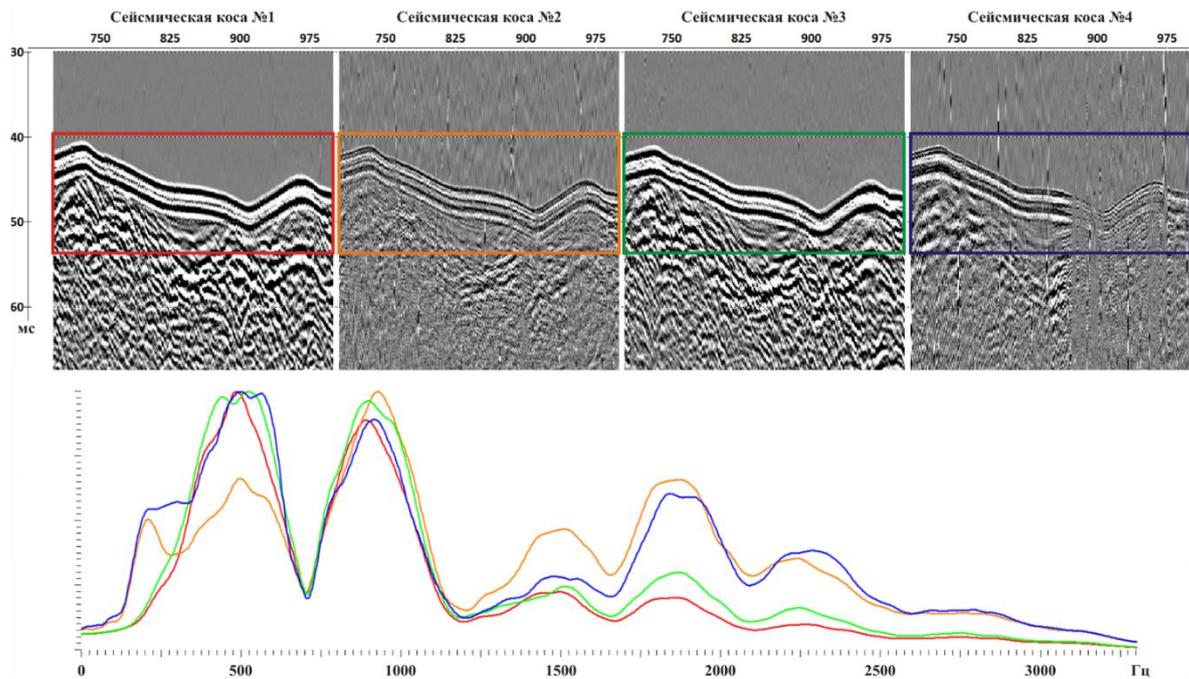


Рис. 2.21: Сравнение амплитудных спектров донного отражения на различных каналах приемной системы

По результатам проведенных экспериментов был сделан вывод, что буксировка нескольких одноканальных сейсмических кос с использованием выстрелов не позволяет получать трехмерные сейсмоакустические данные высокого качества в сейсмогеологических условиях мелководных акваторий при условиях наблюдений отличных от идеальных. Для получения лучших результатов необходимо увеличивать число кос, уменьшать расстояние между ними и между соседними профилями, а также обеспечивать максимально точное соблюдение плановой линии съемки при движении судна.

2.7. Выводы к главе 2

1. В главе 2 рассмотрены преимущества и недостаткам всех известных автору методик трехмерных сейсмоакустических наблюдений на акваториях, сделаны выводы об их применимости в составе инженерно-геологических изысканий;
2. Наиболее высокочастотные системы с жестко закрепленным приемоизлучающим массивом – 3D Chirp, Sub-Bottom Imager, Innomar, SEAMAP-3D – обладают максимальным разрешением по вертикали и горизонтали, но их суточная производительность не превышает 0.1 км², вследствие чего они эффективны только для решения узкоспециализированных задач;
3. Более низкочастотные системы с жестко закрепленным приемоизлучающим массивом – Kite, SEISCAT и Opus3D – могут обеспечить среднюю производительность до 0.75 – 1.5 км²/сутки и имеют линейные размеры 10-15 метров. Однако они не приспособлены к работе в условиях открытой морской акватории, конструкция рамы может являться источником акустического шума при буксировке, а буксировка многоканальных кос подобным образом малоэффективна в связи с высокой вероятностью запутывания;
4. Буксировка с использованием выстрелов является наиболее универсальным способом, поскольку может быть реализована практически на любом судне и спускоподъемные операции не требуют применения дополнительного оборудования, но ширина полосы покрытия не превышает первых десятков метров, что в совокупности с большим расстоянием между приемными элементами приводит к ухудшению горизонтальной разрешающей способности. Уменьшение расстояния между приемными элементами в поперечном направлении может привести к запутыванию сейсмических кос. Производительность может варьироваться от 0.75 до 3.5 км²/сутки.
5. При буксировке приемоизлучающей системы с использованием параванов удастся достигнуть максимальной ширины полосы покрытия, при этом количество кос и расстояние между ними может варьироваться в широких пределах, что позволяет адаптировать систему для решения большого числа различных задач. За счет увеличения расстояния от судна снижается уровень акустических помех и обеспечивается более стабильное положение приемоизлучающего массива при волнении моря. Основным недостатком является необходимость применения специального грузоподъемного оборудования для спуска параванов и их вывода в нужную позицию, что приводит к увеличению стоимости проведения исследований.
6. Большинство приемоизлучающих систем, рассмотренных автором в главе 2, не удовлетворяют условиям, сформулированным в главе 1, и не позволяют идентифицировать мелкомасштабные опасные инженерно-геологические процессы и явления. Невысокие показатели производительности также ограничивают применимость описанных систем в составе инженерно-геологических изысканий.

Глава 3. Новая методика трехмерных сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях

Перед разработкой новой методики трехмерных сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях на основе рассмотрения теоретических аспектов планирования съемок, описанных в главе 1, и анализа существующих на данный момент приемоизлучающих массивов (глава 2), применяемых при проведении детальных исследований верхней части донных отложений, автором были определены следующие требования:

1. Методика должна позволять получить объемное сейсмическое изображение *объектов размером 1 метр и более*, погребенных на глубину до первых десятков метров ниже поверхности дна или расположенных на дне;
2. *Разрешающая способность, размер бина и частотный состав* должны соответствовать требованиям, предъявляемым к трехмерным сейсмоакустическим наблюдениям в составе инженерно-геологических изысканий и сформулированных в главе 1;
3. Приемоизлучающая система и параметры съемки должны иметь возможность *адаптации* к конкретным техническим и инженерно-геологическим условиям и позволять проводить исследования на открытых акваториях глубиной от 5 до 50 метров при оптимальных временных и финансовых затратах;
4. *Буксировка* приемоизлучающего массива должна осуществляться с помощью выстрелов или параванов при скорости судна не менее 3.5 узлов;
5. *Приемная система* должна состоять из производимых серийно многоканальных сейсмических кос, при помощи которых также можно выполнять профильные наблюдения.

3.1. Описание способа буксировки приемоизлучающего массива

На суточную производительность, согласно формуле (26), наибольшее влияние оказывает скорость движения судна по профилю и ширина покрытия. Скорость движения судна при проведении инженерно-геофизических изысканий, как правило, варьируется от 3 до 5 узлов, а при сейсмоакустических наблюдениях 3.5-4 узла, поскольку при дальнейшем увеличении скорости уровень акустических шумов повышается и, как было описано в главе 1, возникают ограничения, связанные с интервалом возбуждения источника. Поэтому основным фактором, определяющим производительность, является ширина полосы покрытия.

Для обеспечения заданной разрешающей способности и размера бина расстояние между приемными элементами в поперечном направлении не должно превышать 0.5-1 метра. Использование фиксированного приемоизлучающего массива на открытых акваториях малоэффективно в соответствии с выводами, приведенными выше. После обобщения личного практического опыта проведения сейсмоакустических наблюдений на различных акваториях и

опыта разработчиков других систем автор пришел к выводу, что при работе на предельном мелководье (глубина воды 5-15 метров) приемоизлучающая система должна иметь возможность буксировки с использованием выстрелов, а при работе на большей глубине – с использованием параванов.

Использование большого количества одноканальных сейсмических кос не представляется перспективным, поскольку требует применения дополнительных технических средств для буксировки, усложняет спускоподъемные операции и не позволяет использовать оборудование для выполнения профильных многоканальных съемок, а близкое расположение сейсмических кос друг к другу может привести к их запутыванию и поломке. Экономические факторы, обуславливающие предпочтительное использование многоканальных кос, рассмотрены ниже.

Решением описанных выше проблем, по мнению автора, может стать использование двух многоканальных сейсмических кос, буксируемых за судном в форме треугольника. Оголовья кос крепятся к выстрелам (Рис. 3.1) или параванам (Рис. 3.2), а хвостовые части соединяются вместе на удалении, равном половине расстояния между каналами, от последней приемной группы.

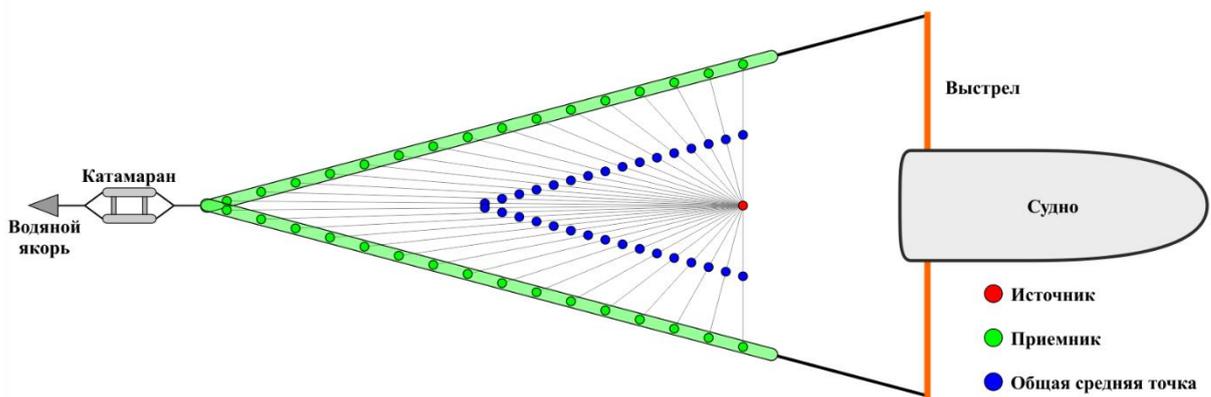


Рис. 3.1: Схема буксировки приемоизлучающего массива при помощи выстрелов

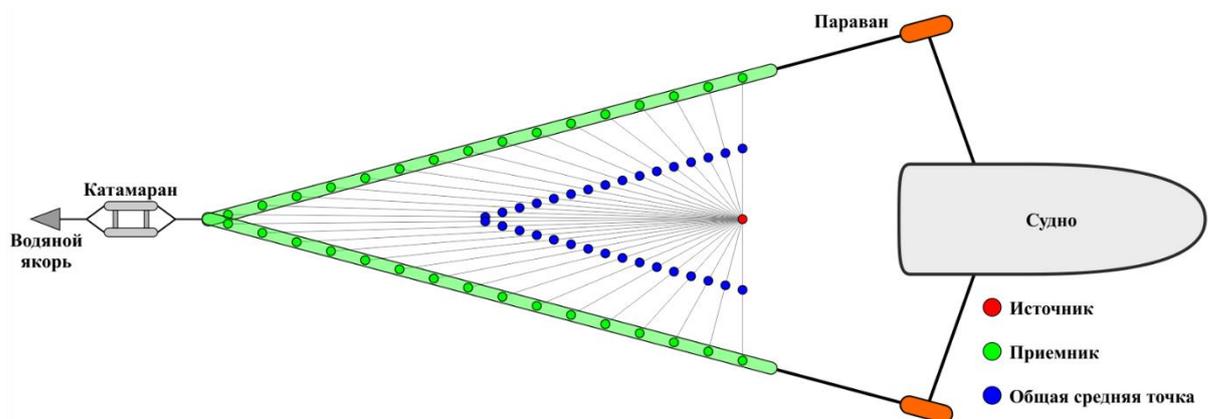


Рис. 3.2: Схема буксировки приемоизлучающего массива при помощи параванов

Очевидно, что в процессе буксировки двух сейсмических кос, соединенных подобным образом, гидродинамическое воздействие приведет к изменению их формы. Достаточно точной

аппроксимацией формы может являться так называемая цепная линия [Меркин, 1980]. Практический опыт работы с приемоизлучающей системой P-Cable 3D показал, что подобное предположение обеспечивает достаточную точность определения координат приемных элементов. Для соблюдения заданной формы приемного массива автором предлагается использовать небольшой катамаран с водяным якорем, размещенный на некотором удалении от точки соединения сейсмических кос. Отрицательная тяга, создаваемая якорем, будет создавать необходимое усилие для выпрямления кос. Для снижения продольной нагрузки на сейсмические косы без стального или кевларового усиления катамаран с якорем может буксироваться на фале или тросе.

В случае использования выстрелов ширина разведения головных частей сейсмических кос определяется шириной судна, которая не превышает 10-15 метров для большинства типов судов, применяемых при проведении инженерно-геофизических исследований на мелководных акваториях, и длиной выстрелов, которая ограничивается их прочностными характеристиками. Поскольку выстрелы в большинстве случаев имеют жесткое крепление к корпусу судна, то при бортовой качке будут происходить их вертикальные перемещения с тем большей амплитудой, чем они длиннее. Это будет приводить к неконтролируемому изменению положения сейсмических кос, что негативно скажется на качестве получаемых данных. Все эти факторы ограничивают максимальную ширину разведения кос до первых десятков метров.

Использование параванов для буксировки приемоизлучающего массива позволяет значительно (до 50-100 метров) увеличить расстояние между оголовьями сейсмических кос. В совокупности с использованием более длинных сейсмических кос это позволяет значительно увеличить производительность съемки.

В зависимости от длины сейсмических кос, расстояния между их оголовьем, числа приемных каналов и количества источников будет изменяться ширина покрытия и характеристики получаемого сейсмического куба. За счет этого возможна адаптация методики для работы на различных акваториях и решения разных задач, как это будет показано ниже.

3.2. Технические требования к приемоизлучающей системе

Требования к многоканальным сейсмическим косам и регистрирующей системе

Как уже отмечалось выше, в основе приемной системы должны использоваться производимые серийно многоканальные сейсмические косы. Ниже (Таблица 7) приведены краткие технические характеристики (на основе рекламных материалов компаний-производителей) наиболее распространенных при проведении инженерно-геофизических исследований сейсмических кос. Если приемные каналы состоят из единичных гидрофонов, то аппаратных ограничений при работе на мелководных акваториях нет. Но в случае

использования сейсмических кос с несколькими приемными элементами в группе необходимо учитывать диаграмму направленности канала, поскольку она сильно влияет на амплитудно-частотные характеристики канала, что в дальнейшем не позволит с достаточной достоверностью использовать получаемые данные для атрибутивного анализа и в целом снизит качество сейсмических кубов. Также желательно, чтобы в результате группирования не происходило подавления прямой волны, так как при обработке это осложнит коррекцию геометрии наблюдений.

Таблица 7: Краткие характеристики сейсмических кос, производимых серийно

Название	Производитель (страна)	Минимальная длина секции, м	Число каналов в секции (максимальное в косе)	Число гидрофонов в группе (шаг, м)	Шаг между каналами, м
GeoEel	Geometrics (США)	25	8 (240)	4-6 (-)	1.5625 / 3.125 / 6.25
Geo-Sense	Geo Marine Survey Systems (Голландия)	75	24 (48)	3 (0.25)	3.125
SIG 16	S.I.G. (Франция)	17	12 (24)	1 (-)	1
Bottom Fish	Си Технолоджи (Россия)	24	30 (192)	2 (0.25-0.5)	0.5 / 1 / 2
Геонт-Шельф	Спектра Гео (Россия)	32	16 (16)	1 (-)	2

Диаграмма направленности зависит от расстояния между гидрофонами (l , м), их числа (n), длины волны (λ , м), угла подхода отраженной волны к приемнику (θ) и может быть определена по формуле (27) [Missiaen, 2005]:

$$A = \frac{\sin(\sin(\theta) nl(\pi/\lambda))}{n \sin(\sin(\theta) l(\pi/\lambda))} \quad (27)$$

Как видно из приведенного ниже графика (Рис. 3.3), на мелководных акваториях с ростом удаления резко увеличивается угол подхода отраженной волны.

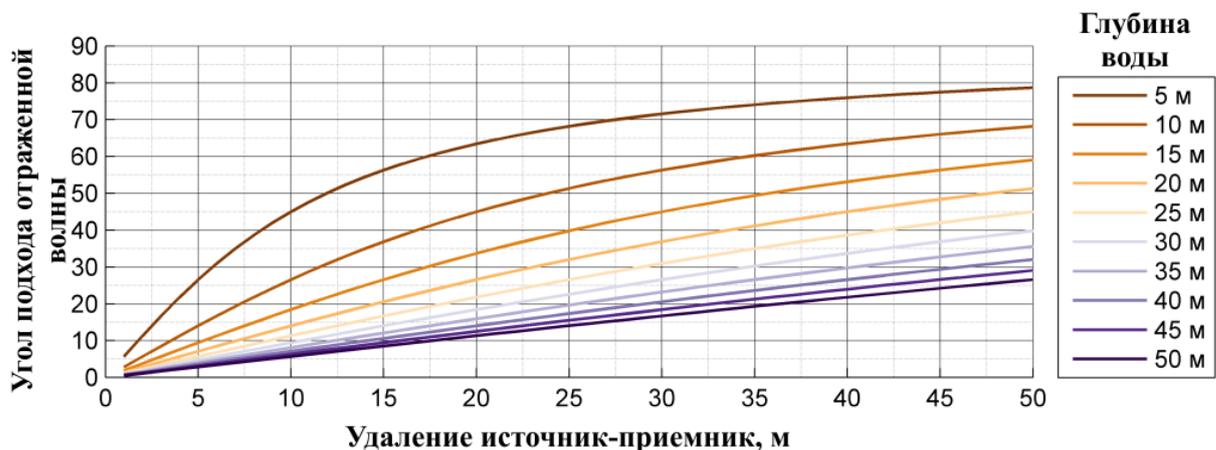


Рис. 3.3: Угол подхода отраженной волны в зависимости от глубины воды и удаления

С увеличением числа приемных элементов, расстояния между ними и центральной частоты сигнала происходит значительное изменение амплитуды, регистрируемой группой приемников (Рис. 3.4). В связи с этим при работе на мелководных акваториях и при относительно больших удалениях источник-приемник сейсмические косы без группирования приемных элементов дают больше преимуществ, а улучшения отношения сигнал/шум возможно путем повышения кратности наблюдений, т.к. относительно небольшая глубинность исследований позволяет уменьшить расстояние между пунктами возбуждения.

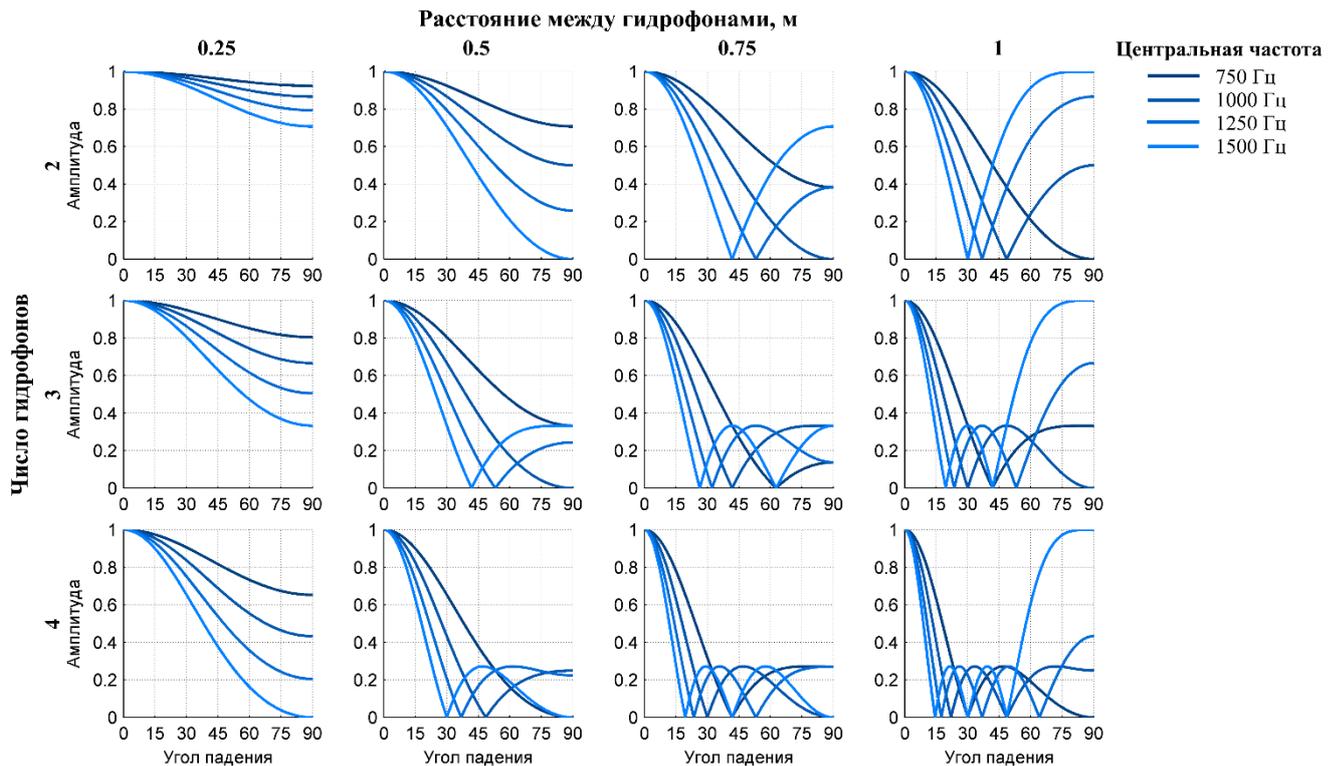


Рис. 3.4: Диаграммы направленности сейсмических каналов, состоящих из 2, 3, 4 гидрофонов и шагом между ними 0.25, 0.5, 0.75, 1 метр для различных частот

Также для конструктивной интерференции отраженных волн внутри группы приемных элементов (одного сейсмического канала) необходимо, чтобы они регистрировались в фазе. Это означает, что разница в путях пробега сейсмической волны между первым и последним гидрофоном группы не должна превышать четверти длины волны [Шерифф, Гелдарт, 1987]. Зависимость между максимальной длиной приемного массива (L , м), глубиной воды (d , м), выносом (x , м) и наименьшей длиной волны (λ , м) может быть описана следующей формулой (28) [Missiaen, 1995]:

$$L = -x \pm \frac{1}{2} \sqrt{4x^2 + \frac{\lambda^2}{4} + 2\lambda\sqrt{4d^2 + x^2}}. \quad (28)$$

Поскольку буксировка сейсмических кос предполагается под углом к направлению движения судна и в хвостовой части располагается водяной якорь, то предпочтительно использовать косы усиленной конструкции, в которых основная нагрузка приходится на

стальную или кевларовую струну, расположенную внутри косы, а не на внешнюю полиуретановую оболочку.

В связи с выбранным способом буксировки приемоизлучающего массива возникает вопрос о максимально допустимом угле отклонения (угле атаки) сейсмических кос от их нормального положения при буксировке. Согласно методических требований современной разведочной сейсморазведки максимальный угол отклонения не должен превышать 5-10° [например, Proffitt, 1991], поскольку это приводит к погрешностям при расчете скоростей и снижает качество суммирования [Levin, 1984]. Однако при наличии сильных течений угол отклонения может составлять до 30°. Другой негативный эффект, вызванный изменением формы сейсмической косы, – низкочастотный акустический шум вследствие турбулентности и кавитации – детально рассматривается в работе [Elboth et al., 2009]. На основе литературного обзора и изучения большого объема практических данных авторами работы [Elboth et al., 2009] делается вывод, что уровень шума при углах атаки менее 15° не превышает критического уровня для проведения сейсмических наблюдений. На практике уровень шумов будет сильно зависеть от таких конструктивных особенностей сейсмической косы, как диаметр внешней оболочки, тип используемых гидрофонов и способ их монтажа, наполнитель. Поэтому на этапе опытно-методических работ необходимо оценить уровень шумов при выбранных параметрах приемоизлучающей системы, а также убедиться, что динамические нагрузки, возникающие при буксировке, не превышают прочностные характеристики сейсмической косы.

Угол атаки сейсмической косы также должен удовлетворять условию, определяемому формулой (29). В противном случае расстояние между приемниками в поперечном направлении будет слишком большим, что приведет к образованию бинов с нулевой кратностью.

$$\alpha \leq \sin^{-1} \frac{2B}{dL'} \quad (29)$$

где B – размер бина (м), dL' – расстояние между каналами (м), α – угол атаки сейсмической косы.

Регистрация трехмерных сейсмоакустических данных должна осуществляться с использованием одной сейсмической станции. В этом случае гарантируется единая временная и, соответственно, координатная привязка всех сейсмических трасс, относящихся к одному пункту возбуждения. При использовании нескольких сейсмических станций, работающих параллельно, необходимо обеспечить их синхронизацию с точностью не более четверти периода центральной частоты регистрируемого сигнала. Для этого предпочтительно использовать высокоточный сигнал синхронизации 1PPS, передаваемый дифференциальными ГНСС-приемниками.

Требования к источнику упругих колебаний

Для возбуждения упругих колебаний при проведении сейсмоакустических наблюдений могут использоваться все виды современных источников (Рис. 3.5). Однако при выборе

источника для трехмерного приемоизлучающего массива, ориентированного на работу в условиях мелководных акваторий, необходимо учитывать несколько факторов:

1. **Полоса излучаемых частот** должна быть широкой для достижения высокой разрешающей способности по вертикали;
2. **Диаграмма направленности** должна обеспечивать получение схожих амплитудно-частотных характеристик на каждом сейсмическом канале, поскольку использование источников с узкой диаграммой направленности на больших удалениях приведет к уменьшению центральной частоты излучаемого сигнала и полосы частот в целом [Verbeek, McGee, 1995; Missiaen, 2008]
3. Источник должен обладать **компактными габаритными размерами** для работы с борта судов с ограниченным свободным пространством;
4. Хорошая **повторяемость формы сигнала** необходима для улучшения качества суммирования сейсмограмм, что положительно сказывается на амплитудно-частотных характеристиках сейсмических трасс после обработки.

Использование пневматических источников ограничивается необходимостью размещения на судне компрессоров и накопителей сжатого воздуха, что требует большого пространства на палубе, а частотные характеристики также не удовлетворяют сформулированным выше требованиям. Гидропушки, несмотря на хорошие частотные характеристики, также малоприменимы в силу габаритных размеров.

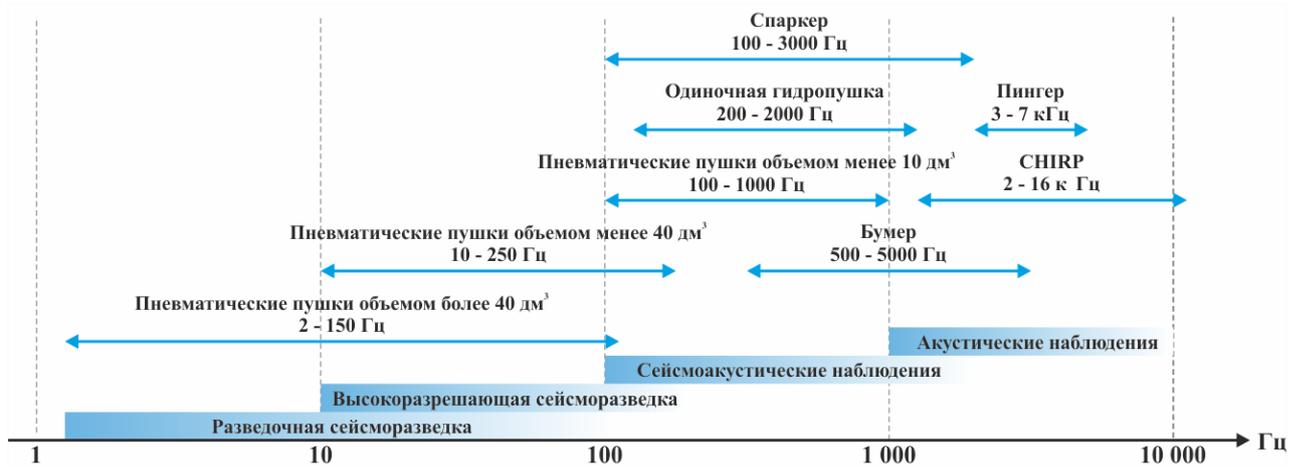


Рис. 3.5: Сравнение частотных характеристик источников упругих колебаний

Электроискровые (типа «спаркер») и электродинамические (типа «бумер») излучатели более удобны при проведении сейсмоакустических наблюдений, поскольку современные высоковольтные источники энергии имеют небольшие габаритные размеры при хороших энергетических показателях.

Излучатели типа «бумер» имеют самую лучшую повторяемость формы сигнала среди всех источников упругих колебаний [Verbeek, McGee, 1995; Müller et al., 2002], обладают широким

спектром сигнала, высокой центральной частотой и могут работать на пресноводных акваториях. Однако к их недостаткам следует отнести необходимость буксировки в приповерхностном слое (первые десятки сантиметров), что ограничивает его применение при волнении и сильную зависимость формы импульса от удаления, вследствие чего нельзя считать его точечным источником [Verbeek, McGee, 1995; Simpkin, 2005].

Излучатели типа «спаркер», как правило, характеризуются относительно плохой повторяемостью формы акустического сигнала [Verbeek, McGee, 1995], что, в первую очередь, связано с постепенной деградацией электродов и, следовательно, изменением площади излучения. Для уменьшения негативных эффектов во время проведения полевых работ требуется зачистка деградировавших электродов, что снижает общую продуктивность съемки. На стабильность формы импульса так же может оказывать влияние изменение электрической проводимости воды, особенно при работе в закрытых заливах с активной гидродинамикой и притоком пресной воды. Совершенствование электроискровых источников привело к созданию многоэлектродных излучателей с отрицательным потенциалом [Rutgers, Jong, 2003]. Их главным преимуществом является сохранение целостности электродов на протяжении длительного цикла разрядов, что в совокупности с точным расчетом амплитудно-частотной характеристики группы позволяет значительно повысить повторяемость формы импульса и увеличить частотный состав возбуждаемых упругих колебаний.

Немаловажным фактором при работе с электроискровым источником является выбор энергии, подаваемой на единичный электрод, – слишком большой заряд может приводить к повторному возбуждению акустического импульса, что значительно увеличивает его длительность и, тем самым, снижает вертикальную разрешающую способность. Современные многоэлектродные излучатели позволяют значительно ослабить вторичные пульсации за счет интерференции импульсов, возбуждаемых различными электродами, а изменение расстояния и количества электродов позволяет сформировать необходимую диаграмму направленности [Калинин и др., 1983; Mosher, Simpkin, 1999; Duchesne et al., 2007], которая должна обязательно анализироваться перед началом проведения трехмерных сейсмоакустических наблюдений.

Рассмотрев все факторы, описанные выше, автор для использования в разработанной методике трехмерных сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях выбрал излучатель типа «спаркер». В ряде случаев, как будет показано ниже, число источников может быть увеличено до двух. Это позволяет увеличить ширину покрытия и набор регистрируемых азимутов. Дальнейшее увеличение числа источников нецелесообразно, поскольку это приведет к уменьшению кратности в продольном направлении в соответствующее число раз, при незначительном увеличении производительности.

Предпочтительно, чтобы буксировка источников также осуществлялась с использованием небольших катамаранов. Это позволяет более точно задать заглубление излучателя и разместить рядом с ним ГНСС-приемник, что значительно повышает точность позиционирования.

Выбор глубины буксировки источников и приемников

Заглубление источника и приемников влияет на форму и частотный диапазон регистрируемых сигналов и, следовательно, разрешающую способность сейсмоакустических наблюдений. Для сейсмоакустических наблюдений выбор глубины буксировки особенно важен для достижения единых амплитудно-частотных характеристик приемных каналов. При совпадении величины заглубления источника и приемника влияние границы вода-воздух на частотную характеристику регистрируемого сигнала будет аналогично влиянию фильтра, определяемого формулой (30) [Калинин и др., 1983; Шалаева, Старовойтов, 2010]:

$$S = K_{\text{н}}(j\omega) = 4 \sin^2 \left(\frac{2\pi f \Delta h \cos \theta}{v_0} \right), \quad (30)$$

где $\cos \theta$ – угол наклона поверхности дна, f – частота (Гц), Δh – заглубление элементов приемоизлучающего массива (м). Влияние волн-спутников будет проявляться в виде нулей амплитудного спектра регистрируемого сигнала. Приблизительная оценка положения минимумов спектра может быть получена по формуле (31) [Lin et al., 2011]:

$$f = \frac{nv}{2d}, \quad (31)$$

где v – скорость звука в воде (м/с), d – глубина буксировки источника (м), $n = 0, 1, 2, \dots$

Для достижения максимума амплитуды регистрируемого сигнала (условие полного согласования) необходимо, чтобы Δh удовлетворяло уравнению (32) [Шалаева, Старовойтов, 2010]:

$$\sin^2 \left(\frac{2\pi f \Delta h \cos \theta}{v_0} \right) = 1, \quad (32)$$

В соответствии с формулой (32), максимум конструктивной интерференции будет достигаться при заглублении элементов приемоизлучающего массива на $1/4$ преобладающей длины волны сигнала. Поскольку при проведении сейсмоакустических наблюдений используются источники с относительно большой центральной частотой (от 400 до 1500 Гц), то заглубление источника и приемников устанавливается в пределах 0.25 – 0.9 метра.

В связи с тем, что приемоизлучающая система буксируется в приповерхностном слое воды, то амплитудно-частотные характеристики регистрируемого сигнала подвержены сильному влиянию волнения моря. При волнении моря отражающая поверхность, соответствующая границе вода-воздух, имеет сложную структуру и коэффициент отражения от нее будет постоянно изменяться, а заглубление источника и приемников будет во многом зависеть от характеристик морских волн. Учитывая непрерывность волнения можно предположить, что даже

в пределах одной сейсмической трассы возможно изменение формы регистрируемого импульса. Так, например, в работе [Певзнер, Калинин, 2002] было показано, что заметные искажения в форме оптимально согласованного отраженного сигнала возникают при величине волнения, превышающего $1/8$ преобладающей длины волны сигнала. Таким образом, при частотах выше 500 Гц даже слабое волнение моря (амплитудой 0.5 – 1 метр) может приводить к негативным последствиям. Длиннопериодные волнения моря (зыбь) создают неестественную волнистость границ, а более быстрые колебания делают оси синфазности практически некоррелируемыми [Гайнанов и др., 2006], вследствие чего на этапе обработки необходим расчет и применение статических поправок. При этом следует отметить, что положительным эффектом волнения моря является значительное снижение энергии кратных волн.

Подавление волн-спутников возможно на этапе регистрации данных. В современной разведочной сейсморазведке для этого применяются различные способы. Использование сейсмических кос со спаренными датчиками (давления и вертикального смещения), буксировка нескольких сейсмических кос на разной глубине или с переменным заглублением позволяет значительно ослабить влияние волн-спутников [Vassalo et al., 2002; Tabti et al., 2009; Lin et al., 2011]. Волны-спутники в источнике предлагается подавлять путем использования группы источников с различным заглублением [Parkes, Hegnal, 2011]. Однако, описанные выше технологии в настоящее время являются дорогостоящими, вследствие чего их использование при проведении инженерно-геологических изысканий затруднено, а также существуют технические ограничения, связанные с работой в приповерхностном слое воды.

3.3. Навигационное обеспечение трехмерной сейсмоакустической съемки

Одним из важных моментов, определяющих качество получаемых 3Д сейсмоакустических данных, является точность позиционирования всех элементов приемоизлучающего массива. Резкое изменение курса судна, волнение моря, зыбь и течения являются наиболее частыми причинами изменения формы и структуры приемоизлучающего массива. На этапе обработки данных это приводит к возникновению разницы между теоретически рассчитанной и фактической геометрией наблюдений, что в конечном счете сказывается на качестве получаемого сейсмического изображения среды.

Все возможные изменения положения системы наблюдений можно разделить на вертикальные и горизонтальные. Источник, как правило, в меньшей степени подвержен отклонению от теоретического положения. Его смещения носят вертикальный характер, в то время как приемные элементы могут совершать как вертикальные, так и горизонтальные перемещения (Рис. 3.6) [Wardell et al., 2002; Missiaen, 2008], что отразится в том числе на значениях удалений и приведет к появлению переменных во времени статических сдвигов.

Поскольку в случае сейсмоакустических наблюдений возможные смещения приемоизлучающей системы сопоставимы с длиной волны регистрируемого сигнала, то это приведет к значительному снижению качества получаемого материала и ошибкам при обработке данных [Wardell et al., 2002; Gutowski et al., 2002; Missiaen, 2005].

Точность определения координат элементов приемоизлучающего массива складывается из: точности относительного позиционирования приемников и источников между собой, точности позиционирования судна и точности определения абсолютных координат элементов приемоизлучающего массива [Missiaen, 2005; Missiaen, 2008]. В качестве критерия необходимой точности позиционирования в работе [Gutowski et al., 2008] предлагается использовать величину, равную четверти длины волны с доминантной частотой. Исходя из размера бина точность определения координат не должна превышать половину его длины, что составляет 0.2-0.3 метра, в соответствии с требованиями, определенными выше. Вне зависимости от точности привязки антенны ГНСС-приемника положение отдельных элементов приемоизлучающего массива и их смещение относительно проектного положения не может быть получено непосредственно из полученных координат [Missiaen, 2008] и требует дополнительных расчетов.

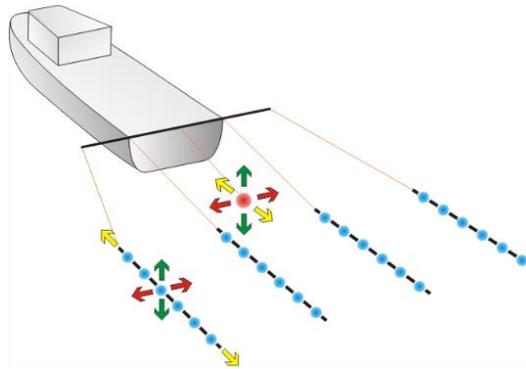


Рис. 3.6: Схематическое изображение возможного движения элементов приемоизлучающего массива [по Wardell et al., 2002]

На сегодняшний день доступно несколько технических решений, позволяющих в реальном времени получать координаты с необходимой точностью. Одним из них является применение ГНСС-приемников, работающих в режиме кинематики реального времени (RTK). Учет ошибок позиционирования осуществляется путем ввода дифференциальных поправок, передающихся в реальном времени по радиоканалу или через сети сотовой связи от базовой станции, установленной на берегу, к мобильным приемникам, установленным на борту судна. Дальность действия RTK составляет порядка 15-25 км на открытой местности, что позволяет применять данный метод для проведения исследований на мелководных частях акваторий. Сантиметровая точность как по горизонтали, так и по вертикали, позволяет успешно применять этот метод при проведении трехмерных сейсмоакустических наблюдений [Missiaen, 2005; Müller et al., 2009],

однако, необходимость размещения на берегу базовой станции требует дополнительного персонала и материально-технических ресурсов.

Более практичным способом высокоточного определения координат является использование ГНСС-приемников, принимающих дифференциальные поправки по спутниковому каналу. Они также позволяют обеспечить субдециметровую точность определения координат с частотой до 10 Гц. К недостаткам данного решения можно отнести высокую стоимость услуг по предоставлению дифференциальных поправок.

Применение дополнительных навигационных датчиков (гироскоп, датчик динамических перемещений и т.д.) позволяет с субдециметровой точностью определить координаты точек буксировки заборного оборудования с учетом фактического положения судна в пространстве. Для достижения большей точности антенны ГНСС-приемников могут размещаться на различных конструктивных элементах приемоизлучающего массива (оконечность выстрела, надводная часть источника, концевой буй, параван) [Wardell et al., 2002; Bull et al., 2005; Scheidhauer et al., 2005; Шматков и др., 2015].

При работах в районах с большими приливно-отливными течениями вертикальная точность измерения должна быть сопоставима с горизонтальной [Missiaen, 2005], поэтому для точного определения величин приливно-отливных течений также необходимо применять автоматические мареографы или данные дифференциальных ГНСС-приемников.

При проведении разведочной трехмерной сейсморазведки для позиционирования кос, их стабилизации и задания требуемого положения как по вертикали, так и по горизонтали, используются специальные контроллеры (так называемые «птицы»). Их активное применение началось в середине 70-х годов XX века [Proffitt, 1991], что позволило существенно уменьшить неконтролируемые смещения приемного массива. Размещенные в них цифровые компасы и датчики глубины позволяют с достаточной точностью определить их положение, относительно точки буксировки и концевого буя, снабженного собственной системой позиционирования. Помимо этого, в контроллерах могут быть установлены маяки-ответчики системы акустического позиционирования, которые позволяют путем перекрестного опроса всей сети получить точное положение относительно приемоизлучающего массива. Однако, высокая стоимость контроллеров глубины, легкие пьезокосы небольшого диаметра и требуемая точность позиционирования не позволяют использовать их для решения задач трехмерных сейсмоакустических наблюдений [Missiaen, 2008]. Системы акустического позиционирования также плохо работают при небольших глубинах и больших углах подхода акустического сигнала, поэтому их применение невозможно.

Таким образом, для позиционирования разработанной трехмерной сейсмоакустической приемоизлучающей системы минимально необходим дифференциальный ГНСС-приемник,

установленный на судне и принимающий поправки в режиме кинематики в реальном времени или через спутниковый канал. Для достижения максимальной точности предполагается использование дополнительных ГНСС-приемников, установленных на выстрелах (Рис. 3.7, а) вблизи точки буксировки или на параванах (Рис. 3.7, б), на катамаране в хвостовой части кос и на источнике.

Контроль относительной точности определения координат элементов приемоизлучающего массива может осуществляться с использованием информации о времени регистрации прямой волны. Для большей точности этого метода может применяться дополнительный источник, буксируемый на некоторой глубине (несколько метров) и используемый только для навигации, что позволит регистрировать прямую волну без интерференции с поверхностью моря.

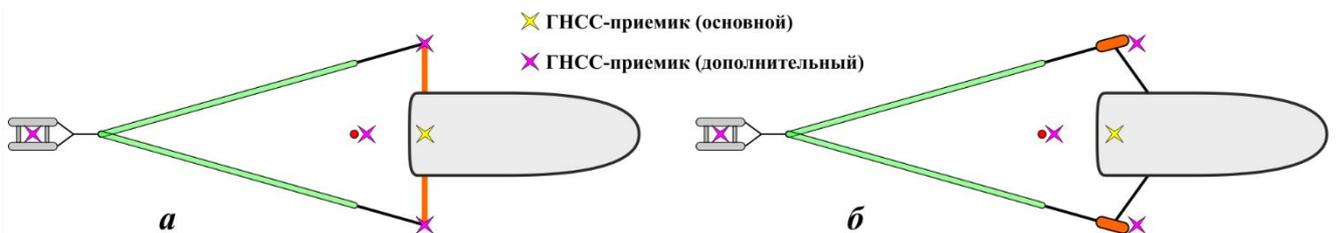


Рис. 3.7: Схема возможного расположения ГНСС-приемников в случае буксировки приемоизлучающего массива с использованием выстрелов (а) и параванов (б)

В случае ошибок в определении координат элементов приемоизлучающего массива сейсмическим трассам будут некорректно присвоены номера бинов, что приведет к снижению горизонтальной разрешающей способности получаемого сейсмического куба.

3.4. Рекомендации по выбору сети наблюдений

Выбор направления профилей съемки и последовательность их выполнения позволяет оптимизировать экономические показатели и в определенной степени влияет на получаемый результат. Разведочные трехмерные съемки в большинстве случаев проводятся по сети **параллельных** профилей. После завершения профиля судно разворачивается и заходит на профиль, расположенный на некотором удалении от текущего (Рис. 3.8, а), что позволяет оптимизировать временные затраты и снизить риск запутывания массива сейсмических кос. Вследствие этого изучаемая площадь разделяется на два крупных блока с различным направлением профилей съемки. Недостатком этого способа проведения наблюдений является неравномерное распределение азимутов в каждом из блоков, что приводит к образованию границы между ними и ухудшается освещенность геологической среды [Vermeer, 2012].

Антипараллельные съемки, при которых ориентировка профилей чередуется, лишены этих недостатков, но для захода на соседний профиль, особенно при небольшом межпрофильном расстоянии, необходимо совершать дополнительные маневры (Рис. 3.8, б). Поскольку именно

этот тип съемки используется при проведении инженерно-геофизических исследований, например, гидролокации бокового обзора, то его использование предпочтительно и при проведении трехмерных сейсмоакустических наблюдений.

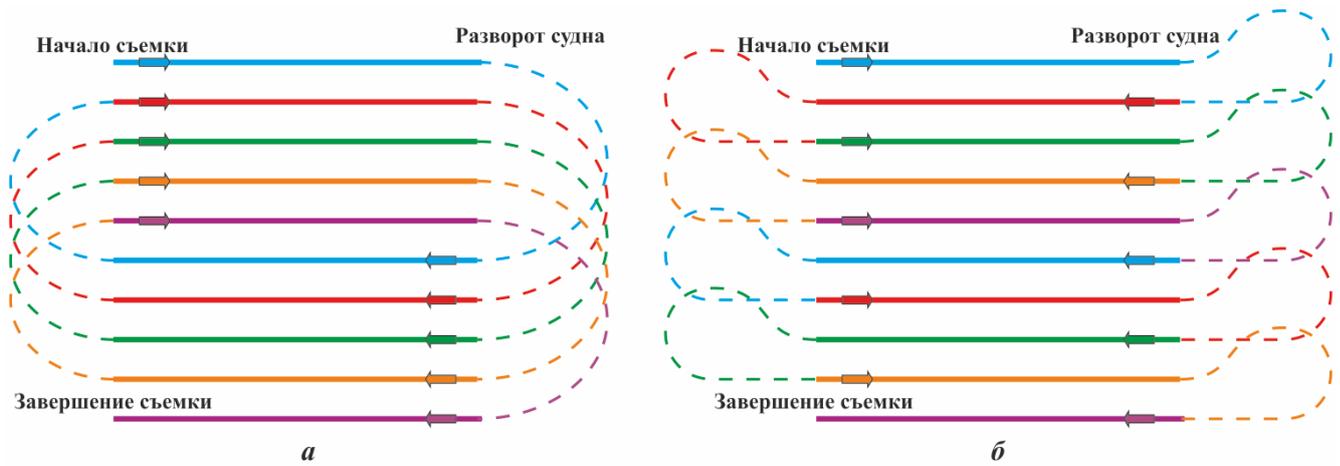


Рис. 3.8: Параллельная (а) [по Vermeer, 2012] и антипараллельная (б) сеть трехмерных наблюдений

3.5. Расчет параметров разработанной методики трехмерных сейсмоакустических наблюдений

В связи со сложной и нестандартной формой приемоизлучающего массива для расчета параметров методики автором была написана программа для системы математических вычислений Octave/MATLAB (Приложение В). Она дает возможность при минимальном вмешательстве оператора оценить все необходимые характеристики системы наблюдений, которые позволят достичь поставленных выше целей и задач, и представить результаты анализа в графическом виде. Предполагается, что все технические аспекты были учтены, в соответствии с данными выше рекомендациями, перед началом расчетов. Для работы программы, согласно последовательности выбора параметров, предложенной автором в главе 1 (Рис. 1.6), необходимо задать:

1. Характеристики акватории в районе исследований: *минимальная глубина* (м), *скорость упругих колебаний в воде* (м/с);
2. Технические характеристики сейсмических кос: *число приемных каналов* и *шаг между ними* (м);
3. Параметры буксировки сейсмических кос: *расстояние между точками буксировки* (м) и *расстояние от центра первого канала до точки буксировки* (м);
4. *Число источников* и их *удаление* (м) от начала координат приемоизлучающего массива;
5. *Длительность импульса прямой волны* (мс) и допустимое *растяжение сигнала* при вводе кинематических поправок;

6. **Скорость движения судна** (в узлах) по профилю и **расстояние между пунктами возбуждения** (м), которые должны быть выбраны с учетом скорости накопления энергии в источнике и необходимой глубинностью исследований;
7. **Коэффициент для уменьшения межпрофильного расстояния**, который применяется, например, как один из способов увеличения кратности наблюдений;
8. **Размер бина** (м).

На основе заданных параметров рассчитываются координаты элементов приемоизлучающего массива и общих средних точек, вспомогательные параметры (угол атаки сейсмической косы, расстояние между приемниками в поперечном направлении) и основные показатели методики съемки (ширина полосы покрытия, межпрофильное расстояние, суточная производительность).

Координаты отдельных приемников могут быть рассчитаны вручную по формулам (33-37):

$$SL = L + dL * (N - 1) + dL/2, \quad (33)$$

$$M = \sqrt{SL^2 - dY^2}, \quad (34)$$

$$\alpha = \sin^{-1}(dY / SL), \quad (35)$$

$$R_x(i) = -M + dL * i * \cos \alpha \mp 0.5 * dL * \cos \alpha, \quad (36)$$

$$R_y(i) = \pm dL * i * \sin \alpha \mp 0.5 * dL * \sin \alpha, \quad (37)$$

где SL – расстояние от точки буксировки до точки соединения кос (м), L – расстояние от точки буксировки до середины первого канала (м), N – число каналов в косе, dL – расстояние между каналами (м), M – расстояние от начала координат до точки соединения кос (м), α – угол атаки сейсмической косы, $R_x(i)$ и $R_y(i)$ – координаты приемников (м). Графическое представление рассчитываемых величин представлено ниже (Рис. 3.9).

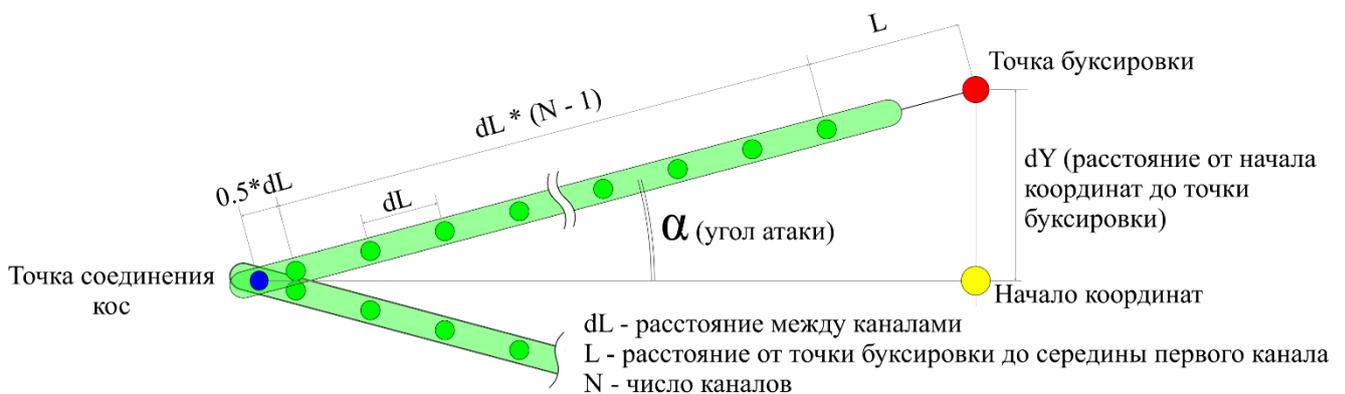


Рис. 3.9: Пояснительный рисунок к расчету координат приемников

В случае использования одного источника упругих колебаний предполагается, что излучатель буксируется с кормы судна и находится на осевой линии приемоизлучающего массива. При использовании двух источников для достижения максимальной ширины покрытия

они должны буксироваться по краям приемоизлучающего массива и в поперечном направлении расстояние от осевой линии (D , м) до каждого из них будет определяться формулой (38):

$$D = N * dL * \sin \alpha. \quad (38)$$

Для достижения минимально возможных углов подхода отраженных волн к приемным каналам источники необходимо размещать в центре приемного массива.

Расстояние между пунктами возбуждения, в соответствии с формулой (17), не должно превышать размера бина. В противном случае это приведет к образованию бинов с нулевой кратностью. Из-за сложной формы приемного массива кратность будет накапливаться за счет сейсмических трасс с разными удалениями, зарегистрированными от разных пунктов возбуждения.

Суточная производительность рассчитывается по формуле (26) с учетом межпрофильного расстояния, если задан соответствующий коэффициент.

Поскольку на мелководных акваториях углы подхода отраженных волн могут достигать нескольких десятков градусов (Рис. 3.3), то в первую очередь необходимо оценить возможность использования рассчитанного приемоизлучающего массива в этих условиях. Для этого рассчитываются теоретические годографы отраженной волны и прямой волны с учетом длины импульса, а также линии мьютинга по формуле (39) [Гайнанов, 2009]:

$$T_{muting} = X / (V \sqrt{S(2 + S)}), \quad (39)$$

где X – удаление (м), V – скорость упругих колебаний (м/с), S – допустимое растяжение сигнала.

Для анализа кратности наблюдений программа, в соответствии с выбранным шагом между пунктами возбуждения и определенным выше межпрофильным расстоянием, задает точки наблюдений. Затем моделируется движение судна по антипараллельным профилям съемки и рассчитывается положение приемоизлучающего массива с учетом направления движения судна. После этого проводится автоматическое бинирование полученного набора общих средних точек и рассчитывается кратность в каждой ячейке. Анализ распределения кратности производится в полнократной зоне.

Кратность наблюдений будет определяться расстоянием между каналами в сейсмических косах, расстоянием между соседними пунктами возбуждения упругих колебаний и межпрофильным расстоянием. Поскольку расстояние между каналами является в большинстве случаев неизменной величиной, то для достижения необходимых показателей необходимо либо уменьшать межпрофильное расстояние, либо расстояние между пунктами возбуждения. В условиях мелководных акваторий глубинность исследований, как правило, не превышает несколько десятков метров, поэтому длина сейсмической записи может быть ограничена. Это дает возможность увеличить периодичность возбуждения источника упругих колебаний и, тем самым, уменьшить расстояние между пунктами возбуждения.

Анализ конфигураций приемоизлучающего массива с одним источником упругих колебаний

Для рассмотрения и анализа основных характеристик описываемой методики автор выбрал приемоизлучающую систему на основе двух 16-канальных сейсмических кос с шагом 2 метра между каналами, так как аналогичное оборудование было доступно для проведения полевого эксперимента, описанного ниже.

В качестве начальных параметров моделирования были заданы следующие входные параметры:

1. Глубина воды – 10 метров;
2. Расстояние между точками буксировки – 16 метров;
3. Расстояние между пунктами возбуждения – 0.5 метра;
4. Один источник, расположенный в начале координат расстановки (Рис. 3.9).

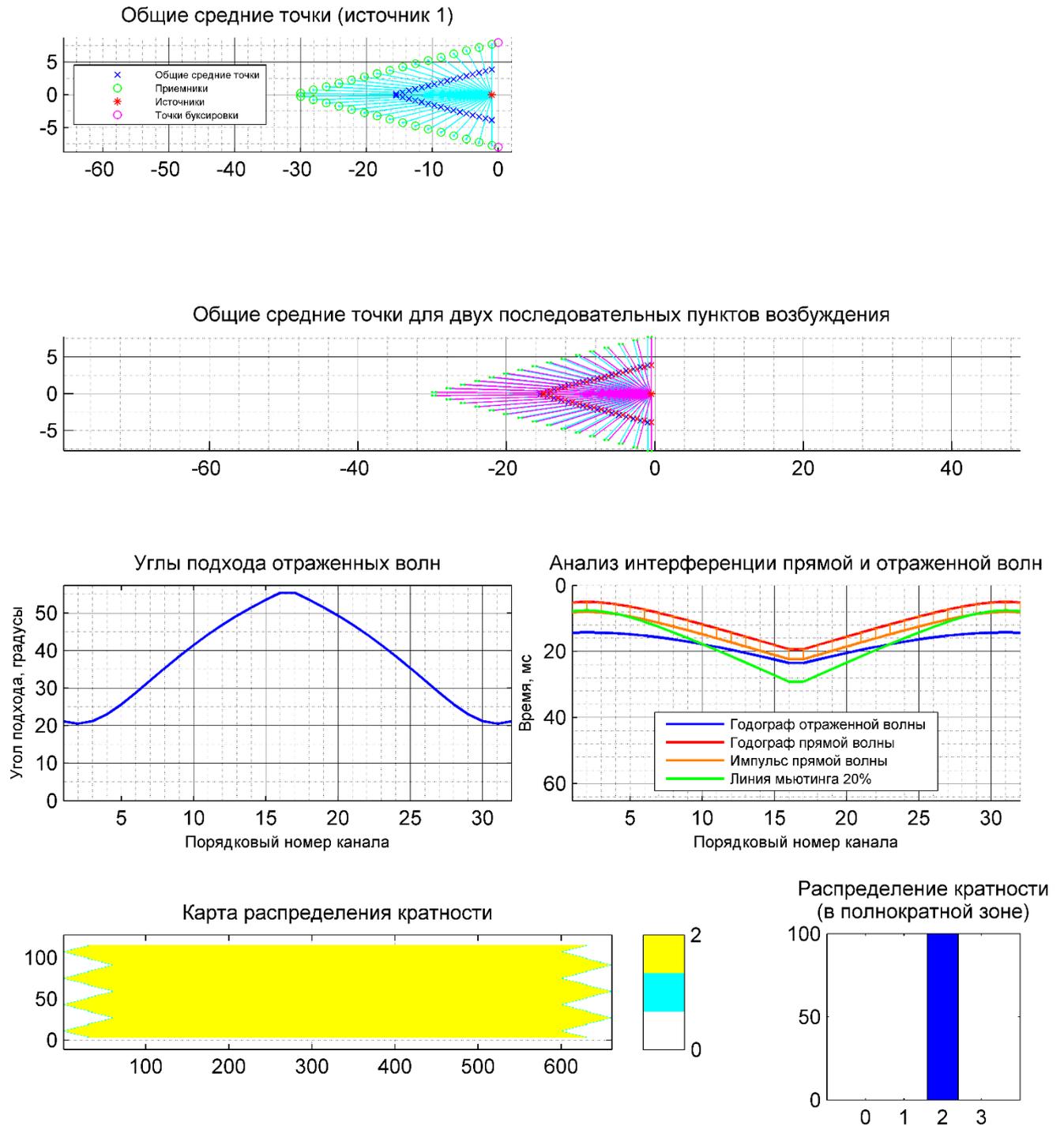
Более подробно начальные параметры моделирования представлены на (Рис. 3.10).

Как видно из результатов автоматического расчета характеристик приемоизлучающего массива (Рис. 3.10), углы подхода отраженных волн варьируются от 20 до 60 градусов, что приводит к растяжению импульса отраженной волны более чем на 20% в центре расстановки (каналы 10-22). В совокупности с интерференцией прямой и отраженной волн это скажется на качестве сейсмического куба. При межпрофильном расстоянии 8 метров и соответствующей ширине покрытия достигается суточная производительность порядка 1 км² с средней кратностью равной 2.

При перемещении источника упругих колебаний в центр приемоизлучающей системы (16 метров от начала координат) (Рис. 3.11) характеристики приемоизлучающей системы не изменяются, за исключением углов подхода отраженных волн, которые уменьшаются до 10-40 градусов. Также уменьшается время регистрации прямой волны, вследствие чего на всех сейсмических каналах возможен прием полезных сигналов с допустимыми искажениями.

Увеличение расстояния между точками буксировки (например, до 20 метров) повлечет за собой уменьшение кратности наблюдений (Рис. 3.12) вследствие большего расстояния между приемными элементами в поперечном направлении. Следует также отметить, что в этом случае появляются сильные отпечатки системы наблюдений, поэтому кратность варьируется от 1 до 2. Суточная производительность, вследствие увеличения ширины покрытия, увеличивается до 1.3 км².

В случае уменьшения расстояния между точками буксировки до 12 метров (Рис. 3.13) также наблюдается неравномерное распространение кратности наблюдений (2-3) в поперечном направлении. Суточная производительность в этом случае уменьшается до 0.8 км².

**Входные параметры:**

Число приемников в косе: 16
 Расстояние между каналами (м): 2
 Расстояние между точками буксировки (м): 16
 Расстояние до центра первого канала (м): 1
 Число источников: 1
 Удаление источника (м): 1
 Скорость судна (узлы): 3.5
 Расстояние между пунктами возбуждения (м): 0.5
 Размер бина (м): 0.5 x 0.5
 Минимальная глубина воды (м): 10

Рассчитанные параметры:

Угол атаки косы (градусы): 14.5
 Расстояние между приемниками в поперечном направлении (м): 0.50
 Ширина покрытия (м): 8.00
 Межпрофильное расстояние (м): 8.00
 Суточная производительность (км²): 1.04

Рис. 3.10: Результаты анализа характеристик приемоизлучающего массива с одним источником упругих колебаний

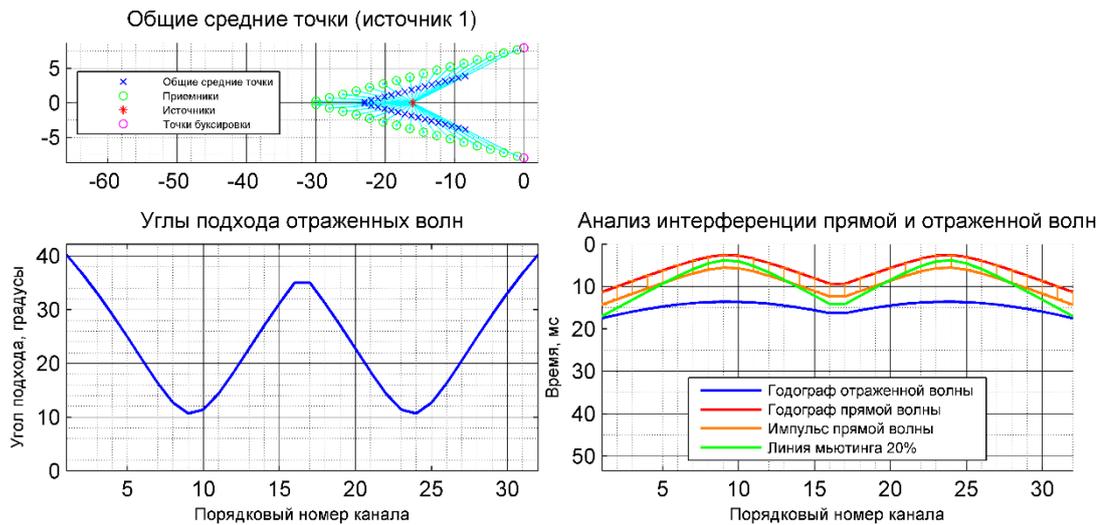


Рис. 3.11: Результаты анализа характеристик приемоизлучающего массива с измененным положением источника упругих колебаний

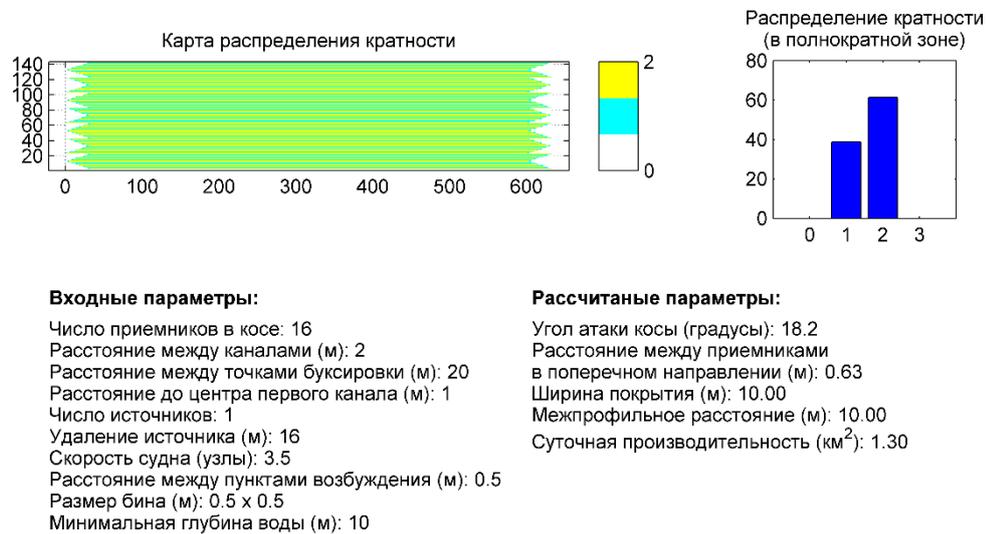


Рис. 3.12: Распределение кратности (расстояние между точками буксировки 20 метров)

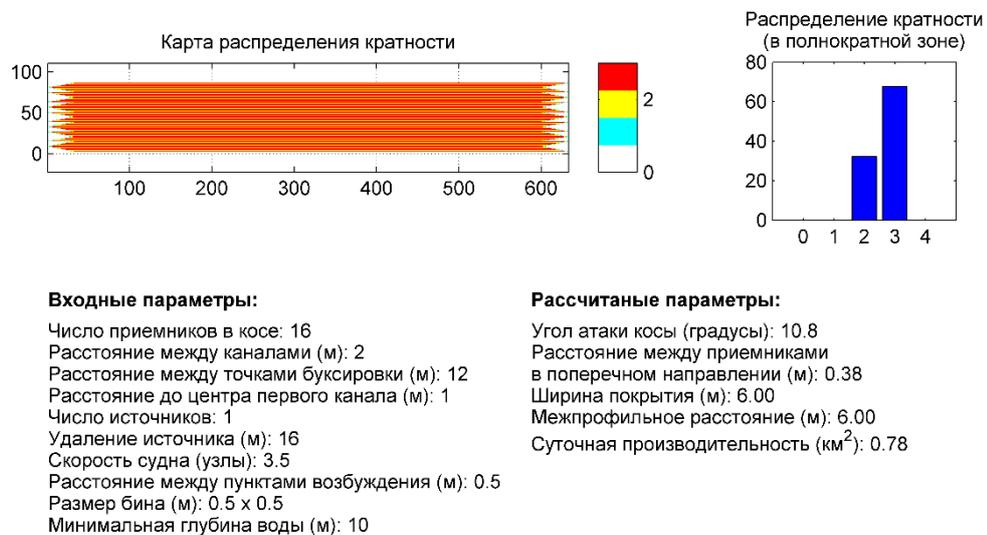


Рис. 3.13: Распределение кратности (расстояние между точками буксировки 12 метров)

При расстоянии между точками буксировки, равном 8 метрам, распределение кратности также равномерное (Рис. 3.14), поскольку расстояние между приемниками в поперечном направлении пропорционально выбранному размеру бина. Однако, в этом случае суточная производительность не превышает 0.5 км^2 .

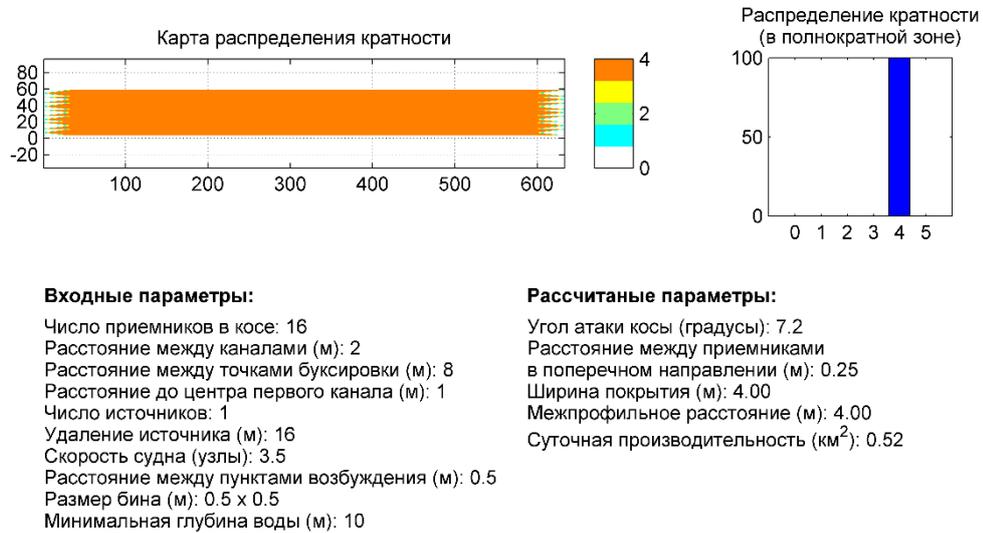


Рис. 3.14: Распределение кратности (расстояние между точками буксировки 8 метров)

Оптимальное распределение кратности при максимальной ширине покрытия и заданном расстоянии между приемными каналами в косе будет достигаться в том случае, когда расстояние между приемниками в поперечном направлении пропорционально размеру бина.

Увеличение кратности наблюдений может быть достигнуто несколькими способами – уменьшением расстояния между каналами в сейсмической косе, интервала возбуждения или межпрофильного расстояния. Для обеспечения равномерного распределения кратности все изменения должны соотноситься с размерами бина и характеристиками оборудования. Например, при уменьшении интервала возбуждения до 0.4 м проявляются отпечатки системы наблюдений (Рис. 3.15).

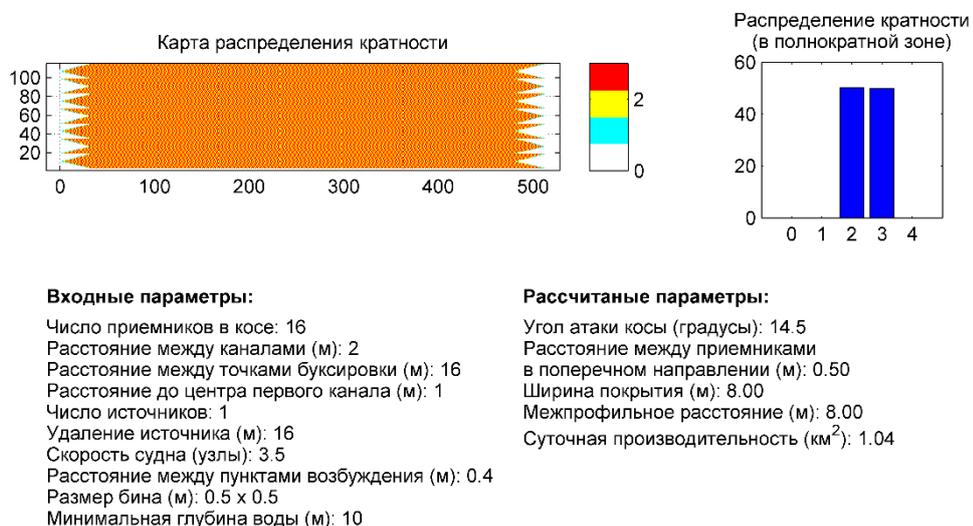


Рис. 3.15: Распределение кратности (интервал возбуждения 0.4 м)

В случае непропорционального уменьшения межпрофильного расстояния отпечатки системы наблюдений будут выражены в виде линейных зон повышенной кратности (Рис. 3.16).

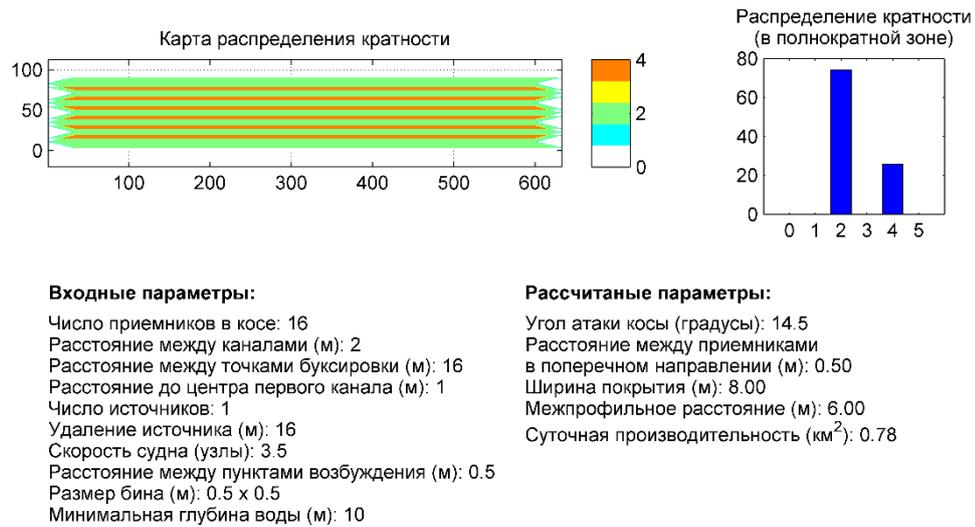


Рис. 3.16: Распределение кратности (межпрофильное расстояние уменьшено на 25%)

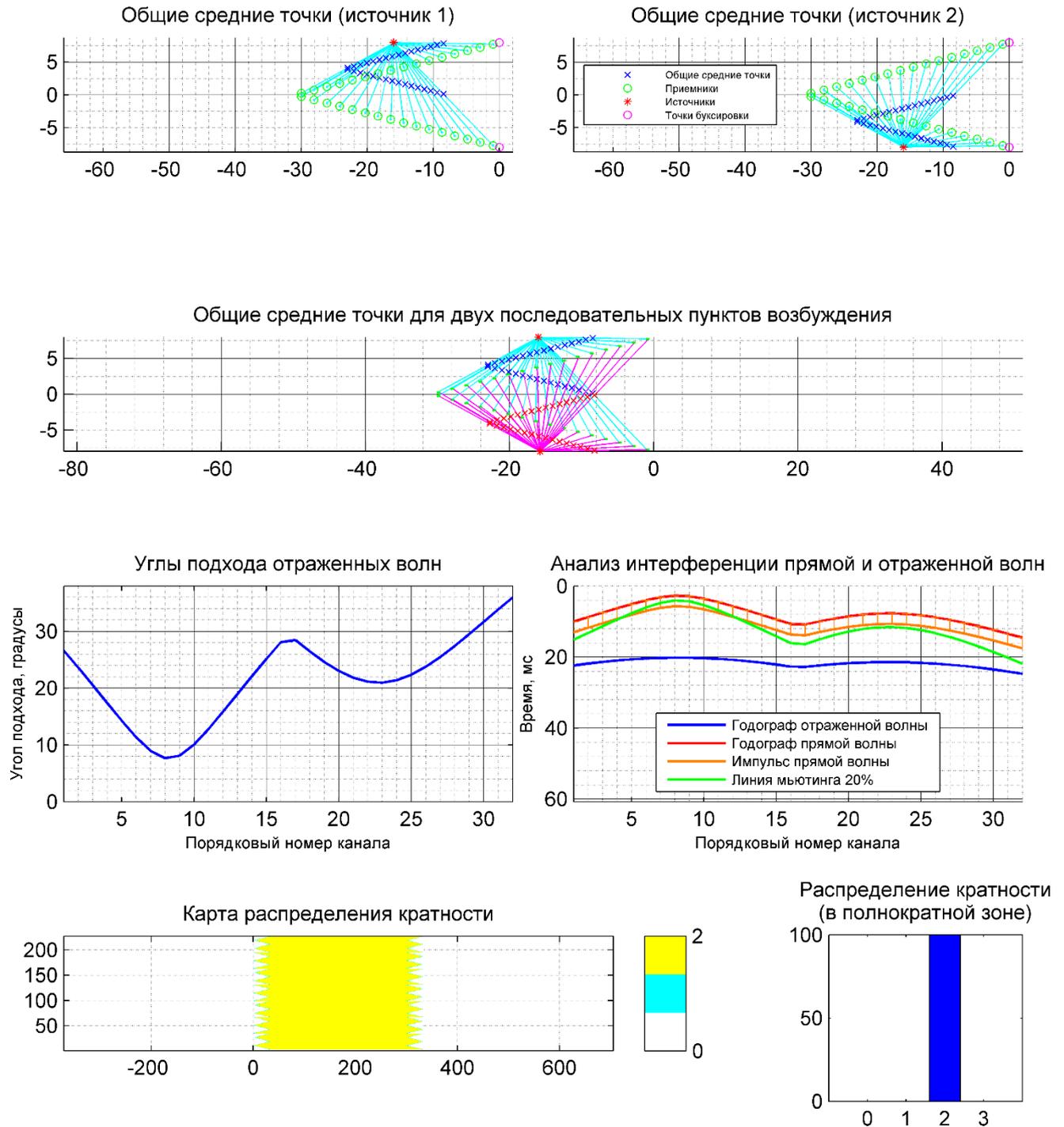
При сравнимой суточной производительности конфигурация приемоизлучающей системы с уменьшенным расстоянием между сейсмическими косами (Рис. 3.13) представляется более перспективной, поскольку контраст кратности на различных участках ниже.

Описанные выше закономерности изменения свойств приемоизлучающего массива в зависимости от соотношения начальных параметров также справедливы для любых сейсмических кос произвольной длины и характеристик. При изменении числа приемных каналов или расстояния между ними будут пропорционально изменяться минимальная глубина акватории, необходимая для получения кондиционных данных, и суточная производительность.

Анализ конфигураций приемоизлучающего массива с двумя источниками упругих колебаний

Увеличение ширины покрытия за один проход судна может быть достигнуто путем изменения числа источников упругих колебаний, работающих попеременно. Однако в условиях мелководных акваторий и высокоплотной сети наблюдений возникает ряд технических ограничений, которые должны учитываться при анализе приемоизлучающей системы.

Например, при аналогичной конфигурации приемоизлучающего массива, описанного выше (Рис. 3.10), но с двумя источниками, расположенными по обе стороны приемоизлучающего массива, и уменьшенным до 0.25 метра расстоянием между пунктами возбуждения (0.5 метра между возбуждениями одним и тем же источником), достигается суточная производительность порядка 2 км². Кратность наблюдений также, как и в случае использования одного источника, равняется 2 (Рис. 3.17).



Входные параметры:

Число приемников в косе: 16
 Расстояние между каналами (м): 2
 Расстояние между точками буксировки (м): 16
 Расстояние до центра первого канала (м): 1
 Число источников: 2
 Удаление источника (м): 16
 Скорость судна (узлы): 3.5
 Расстояние между пунктами возбуждения (м): 0.25
 Размер бина (м): 0.5 x 0.5
 Минимальная глубина воды (м): 15

Рассчитанные параметры:

Угол атаки косы (градусы): 14.5
 Расстояние между приемниками в поперечном направлении (м): 0.50
 Ширина покрытия (м): 16.00
 Межпрофильное расстояние (м): 16.00
 Суточная производительность (км²): 2.07

Рис. 3.17: Результаты анализа характеристик приемоизлучающего массива с двумя источниками упругих колебаний

Основной недостаток конфигураций приемоизлучающих массивов с двумя источниками упругих колебаний, как уже отмечалось выше, – уменьшение продольной кратности наблюдений. Для компенсации этого эффекта необходимо пропорционально уменьшать расстояние между пунктами возбуждения. Изменение скорости судна не всегда возможно в силу технических ограничений, поэтому необходимо увеличивать периодичность возбуждения упругих колебаний. Для этого необходимы высоковольтные источники энергии со скоростью заряда не менее 1000 Дж в секунду (например, Geo Marine Survey Systems, Applied Acoustic Engineering и т.д.). Это позволяет возбуждать упругие колебания с периодичностью до 5 раз в секунду, что при скорости движения судна около 3.5 узлов обеспечивает интервал возбуждения порядка 0.3 метра. При этом время регистрации данных не может превышать 150-200 мс, поэтому максимальная глубинность исследований (от поверхности воды) не превышает 100-150 метров.

За счет смещения источников от осевой линии приемоизлучающей системы происходит изменение углов и азимутов подхода отраженных волн, что приводит к увеличению минимальных глубин акватории, на которых регистрируемый сигнал не искажается.

Большей эффективности при использовании двух источников упругих колебаний можно также добиться при увеличении размера бина до 1×1 метр. В этом случае может достигаться суточная производительность до 2-3 км².

При необходимости повышения кратности наблюдений в условиях предельного мелководья, где глубинность исследований ограничена, размещение двух источников также возможно рядом. При их попеременном возбуждении может быть достигнута вдвое большая кратность наблюдений.

3.6. Анализ экономических показателей разработанной методики

Как уже отмечалось выше, экономические показатели играют немаловажную роль при использовании трехмерных сейсмоакустических методик при проведении инженерно-геофизических и других видов исследований. Связано это с ограниченным бюджетом на проведение полевых работ, высокой стоимостью фрахта судна и аренды/покупки оборудования. В связи с этим используемые методики должны обеспечивать получение максимального объема необходимой информации в минимальные сроки, особенно с учетом того факта, что с увеличением разрешающей способности требования к гидрометеорологическим условиям также возрастают.

Экономическую эффективность любой методики трехмерных сейсмоакустических наблюдений на акваториях можно рассматривать как сочетание нескольких факторов:

1. **Стоимость оборудования** и дополнительных материалов, необходимых для использования системы. Поскольку наиболее затратной частью является приемная система, то для сравнения можно ввести понятие **стоимости** одного **сейсмического канала**;
2. **Стоимость квадратного километра** съемки в районе исследований, которая может быть определена из стоимости суток работы судна и суточной производительности используемой системы наблюдений;
3. **Научная и практическая ценность получаемых данных**, позволяющая снизить риски, например, при строительстве или эксплуатации гидротехнических сооружений.

Достижение такой же плотности наблюдений в поперечном направлении, как в случае применения разработанной автором методики, возможно только при использовании приемоизлучающих массивов с фиксированным положением элементов, построенных на базе одноканальных сейсмических кос. В случае использования серийно выпускаемого оборудования (например, кос Geo-Sense Mini-Streamer и 24-канальных кос Geo-Sense 24 Streamer производства Geo Marine Survey Systems) стоимость набора одноканальных кос, достаточных для формирования приемной системы, будет в 2-2.5 раза выше стоимости 24-канальной сейсмической косы, что объясняется использованием большего числа гидрофонов в сейсмическом канале одноканальных кос и тем, что затраты на изготовление нескольких устройств будут выше, чем одного. Дополнительные затраты также понадобятся при изготовлении и транспортировке конструкции для буксировки приемоизлучающего массива, а усложнение спускоподъемных операций скажется на суточной производительности. Все эти факторы приведут к пропорциональному увеличению себестоимости проведения полевых наблюдений и, следовательно, стоимости квадратного километра съемки.

При использовании разработанной автором методики в составе инженерно-геологических изысканий стоимость квадратного километра уменьшается за счет использования оборудования (сейсмических кос), которые и так уже имеются на борту. Дополнительный экономический эффект будет достигаться за счет получения более полной информации о трехмерном строении верхней части донных отложений, что позволяет снизить риски на последующих этапах работ.

В случае проведения трехмерной сейсмоакустической съемки на мелководной акватории одновременно с другими методиками (например, гидролокацией бокового обзора или батиметрической съемкой многолучевым эхолотом) увеличение стоимости проекта в целом будет минимальным, поскольку будет использоваться судовое время, отведенное на их выполнение.

3.7. Преимущества и ограничения разработанной методики

Разработанная автором методика трехмерных сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях может использоваться для решения широкого класса задач в составе инженерно-геологических изысканий или научных проектов, связанных с изучением верхней части донных отложений. Рассмотрим *преимущества* и *возможности* новой методики по сравнению с профильными наблюдениями и другими трехмерными приемоизлучающими системами с большими размерами бина:

1. Приемная часть может быть сформирована из любых многоканальных сейсмических кос, удовлетворяющих минимальным техническим требованиям, сформулированным выше. Это позволяет проводить трехмерные сейсмоакустические наблюдения с минимальными экономическими затратами, при этом ширина покрытия и плотность наблюдений в поперечном направлении превосходит параметры большинства существующих методик (Приложение Б);
2. Геометрия и характеристики приемоизлучающей системы могут быть адаптированы к конкретным геологическим условиям с минимальными временными затратами, в том числе и непосредственно при проведении съемки;
3. Высокая суточная производительность позволяет эффективно решать поставленные задачи, снижая затраты на проведение полевых работ;
4. Предлагаемая форма приемоизлучающего массива (треугольник) дает возможность снизить уровень шумов от судна, поскольку все приемные каналы имеют максимально возможное удаление от кормы, в отличие от многих других систем, буксирующихся непосредственно в кильватерной струе;
5. При проведении профильных наблюдений с применением трехмерной приемоизлучающей системы возможен корректный учет боковых отражений при построении сейсмического изображения геологической среды (миграции). Также это позволяет за один проход судна изучать инженерно-геологические условия вблизи трасс линейных сооружений, что значительно снижает затраты на проведение полевых работ и повышает достоверность получаемых данных;
6. Методика позволяет осуществлять поиск и картирование объектов с небольшими линейными размерами (валуны/камни). В связи с высокой плотностью расположения приемных элементов можно получить набор сейсмограмм общих удалений, смещенных друг относительно друга в поперечном, относительно линии профиля, направлении. После соответствующих процедур обработки их можно попарно вычесть. При этом амплитуда локально-однородных структур, связанных с нормальным геологическим строением, уменьшится и на их фоне будут хорошо прослеживаться аномальные объекты;

7. Получение информации о строении геологической среды с более высоким разрешением. До суммирования полученного сейсмического куба можно сформировать сейсмограммы, состоящие из сейсмических трасс, относящихся к одному поперечному профилю куба (cross-line), которые будут обладать более высоким горизонтальным разрешением, чем сейсмический куб после суммирования. Несмотря на низкое отношение сигнал/шум полученных таким образом сейсмограмм, это позволяет более уверенно прослеживать отражающие горизонты и выделять мелкомасштабные объекты.

В связи с сильной изменчивостью сейсмогеологических и инженерно-геологических условий в различных акваториях, особенно на шельфе арктических морей, невозможно разработать методику трехмерных сейсмоакустических наблюдений, которая бы давала качественный результат при сочетании любых факторов. Описание новой методики наблюдений не может быть полным без рассмотрения ее *ограничений и недостатков*:

1. С уменьшением глубины воды эффективность приемоизлучающей системы снижается в связи с увеличением угла подхода отраженных волн и сильным растяжением сейсмического импульса. При этом с увеличением длины используемой сейсмической косы минимально возможная глубина акватории увеличивается;
2. Ширина покрытия ограничивается расстоянием между приемными каналами и допустимым углом атаки сейсмической косы. Для достижения максимально возможного качества сейсмического изображения геологической среды необходимо применять косы с расстоянием между каналами порядка 1 метра, что приводит к увеличению стоимости оборудования и съемки;
3. При углах атаки сейсмических кос больше 15° возможно значительное увеличение уровня акустических шумов, вызванных турбулентными потоками вокруг буксируемой косы;
4. При резких изменениях курса судна форма приемной системы будет изменяться и вследствие этого точность определения координат приемных групп будет уменьшаться, снижая качество получаемого сейсмического куба;
5. Очевидно, что методика подвержена влиянию гидрометеорологических условий и с увеличением высоты волн качество данных будет уменьшаться. При работе в акваториях с сильными течениями возможны изменения формы сейсмических кос, что потребует учета при расчете геометрии наблюдений, а также ухудшится равномерность покрытия;
6. В связи с небольшой кратностью наблюдений и размерами бина возможности проведения скоростного анализа ограничены. Однако, при проведении скоростного анализа с увеличенным размером бина можно получить грубую модель распределения скоростей в верхней части донных отложений.

3.8. Практическая реализация разработанной методики и опытно-методические работы в акватории Белого моря

Полевой эксперимент с использованием новой методики трехмерных сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях, предложенной автором, проводился в период с 4 по 8 июля 2014 года в губе Ругозерская Кандалакшского залива Белого моря. Район исследований располагается в 4 км восточнее н.п. Пояконда и в 9 км западнее ББС МГУ (Рис. 3.18).

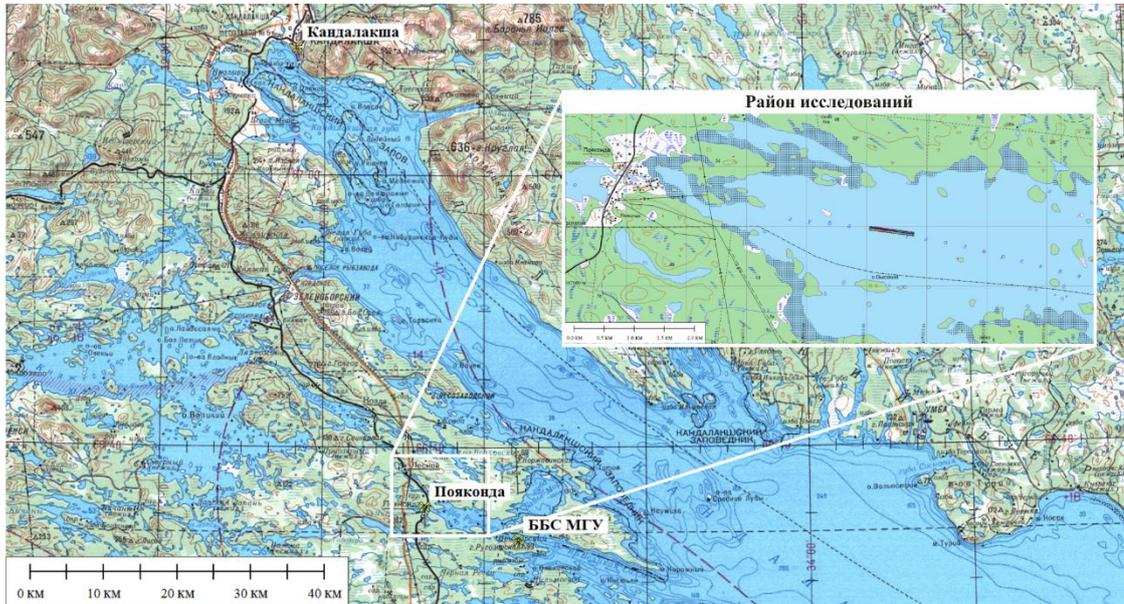


Рис. 3.18: Схема расположения района работ в акватории Белого моря

Выбор опытного полигона для апробации разработанной методики был обусловлен несколькими причинами:

1. Анализ профильных сейсмоакустических наблюдений, проводившихся в этом районе при участии автора в период с 2008 по 2014 год, показал наличие большого количества геологических объектов, представляющих интерес для изучения;
2. Наличие большого объема сейсмоакустических данных, зарегистрированных с применением различных видов источников, позволяет оценить достоверность полученных результатов;
3. Закрытый характер акватории, хорошо изученные гидрометеорологические условия и близкое расположение ББС МГУ позволяют провести работы при относительно небольшом волнении моря;
4. Глубина воды на большей части акватории губы Ругозерская оптимальна для проведения эксперимента с заданными параметрами приемоизлучающей системы.

Проведение опытно-методических работ осуществлялось с борта НИС «Студент» (Рис. 3.19). Судно имеет длину 14.5 м и ширину 3 м в кормовой части, а для буксировки сейсмических кос используются штатно установленные выстрелы длиной до 4.5 метров.



Рис. 3.19: НИС «Студент» в акватории Белого моря

Перед началом проведения полевых работ была проведена мобилизация геофизического и навигационного оборудования, во время которой также были измерены офсеты и введены соответствующие поправки в навигационную систему. После этого было проведено испытание всего комплекса у причала.

Приемная часть состояла из двух многоканальных аналоговых сейсмических кос Геонт-Шельф (Россия). Каждая коса состоит из 16 каналов, включающих в себя единичный гидрофон и предусилитель. Расстояние между каналами составляет 2 метра, а общая длина – 34 метра с учетом оголовья и хвостовой части. Внешняя оболочка косы выполнена из армированного полиуретанового шланга с диаметром порядка 30 мм и заполнена смесью жидких парафинов. Для достижения нейтральной плавучести внутри косы также имеются элементы из пенопласта (Рис. 3.20).



Рис. 3.20: Внешний вид многоканальной сейсмической косы Геонт-Шельф

Для регистрации сейсмоакустических данных использовались две независимые сейсмические станции Геонт-Шельф (Россия) (Рис. 3.21). В качестве АЦП используется плата L-Card E440 с разрядностью 14 бит. Запись полученных данных и управление каждой станцией осуществлялось с использованием двух ноутбуков и программы регистрации, разработанной

В.Г. Гайнановым. Каждый отдельный профиль съемки записывался в отдельный файл формата SEG-Y. Во время разворотов судна запись останавливалась.



Рис. 3.21: Система регистрации трехмерных сейсмоакустических данных на базе двух независимых сейсмических станций Геонт-Шельф

Импульс запуска генерировался два раза в секунду кварцевым таймером ведущей сейсмической станции и затем передавался на ведомую сейсмическую станцию и накопитель энергии. На схеме (Рис. 3.22) показаны основные компоненты приемоизлучающей системы и схема их соединения во время проведения полевого эксперимента.



Рис. 3.22: Схема коммуникаций основных компонентов приемоизлучающей системы

Для возбуждения упругих колебаний автором было решено использовать многоэлектродный электроискровой излучатель типа «спаркер». Электроды распределялись равномерно по спирали 90° с шагом 1 см на базе 1.5 метра. Схема строения излучателя приведена ниже (Рис. 3.23). В качестве магистральной линии использовался коаксиальный кабель диаметром 11 мм. Энергия (100 Дж) на излучатель подавалась высоковольтным источником CSP-D 2400 (Рис. 4.9) два раза в секунду.

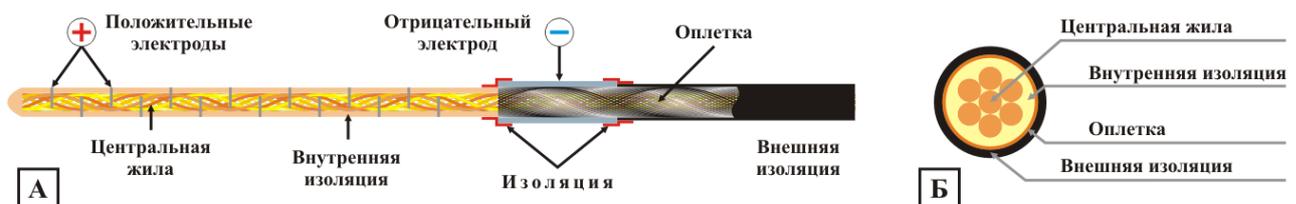


Рис. 3.23: Схематическое изображение излучателя типа «спаркер» (а) и поперечный разрез магистральной линии (б)

Географическая привязка пунктов наблюдений и навигация судна осуществлялась при помощи дифференциального приемника глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) C-Nav 3050, антенна которого была установлена на верхней части А-рамы (Рис. 3.19). Его отличительной особенностью является возможность получения дифференциальных поправок через спутники Inmarsat, что позволило обеспечить дециметровую точность наблюдений. Помимо определения координат, данные ГНСС приемника использовались для синхронизации времени сейсмических станций. Для судовождения по заранее проложенным профилям съемки, а также регистрации высокоточной навигационной информации использовался программный пакет NuPack 2012.

Первый этап экспериментов проходил 04 июля 2014 года и включал в себя следующие операции:

1. Балансировка сейсмических кос, которая заключалась в подборе оптимального заглубления каждого канала. Для этого косы буксировались параллельно с двух выстрелов, а источник находился в рабочем положении за кормой судна. Анализируя амплитудно-частотные характеристики отраженного сигнала, принималось решение об изменении заглубления косы. Для придания косе необходимой плавучести использовались свинцовые и полиэтиленовые элементы. При этом для улучшения гидродинамических свойств и уменьшения шумов буксировки, вызванных изменением внешней формы косы, элементы закреплялись на некотором удалении от гидрофона в направлении, противоположном движению судна;
2. Настройка сейсмических станций для одновременной регистрации данных с двух сейсмических станций;
3. Определение оптимального способа крепления сейсмических кос к выстрелам на необходимом удалении от судна и установка амортизаторов для уменьшения динамических нагрузок на сейсмические косы;
4. Выбор последовательности спускоподъемных операций для оптимизации временных затрат при проведении трехмерных сейсмоакустических наблюдений.

Перед началом **второго этапа** полевых экспериментов – проведения трехмерной сейсмоакустической съемки с использованием разработанной автором методики – была запланирована сеть профилей (Рис. 3.24, Б) длиной 750 метров и межпрофильным расстоянием 3 метра. Их нумерация была выбрана следующим образом: литера обозначает порядковый номер внутри группы из 7 профилей, образующих полосу шириной 18 метров, цифра – порядковый номер группы. Однако, в связи со сложными гидрометеорологическими условиями, при проведении эксперимента не удалось точно соблюсти запланированную сеть профилей (Рис. 3.24, В). Сводная информация о выполненных профилях съемки приведена в приложении Г.

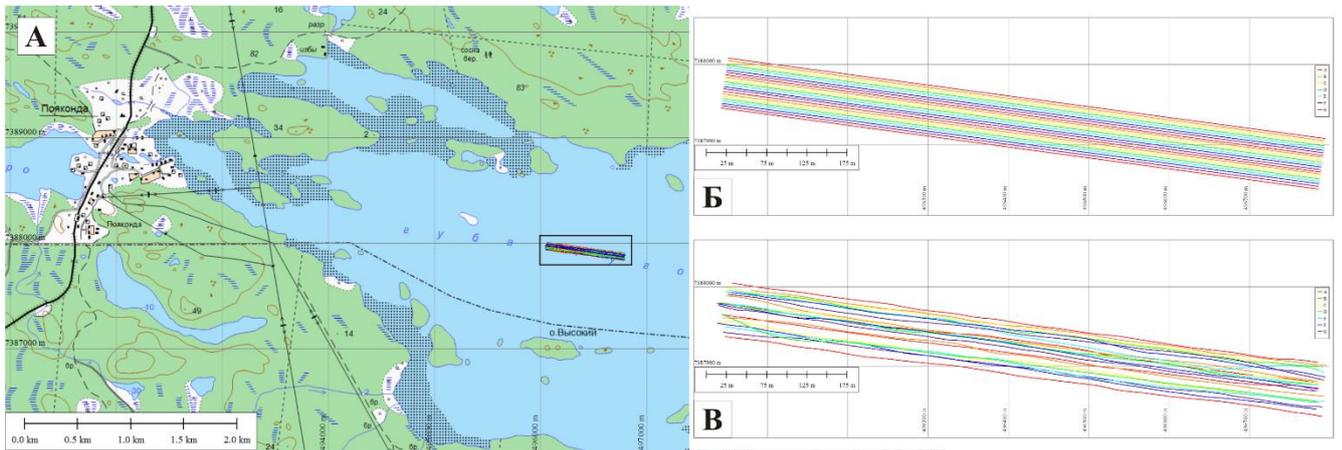


Рис. 3.24: Схема района работ (А), плановая (Б) и фактическая (В) сеть профилей

Поскольку сейсмические косы, использовавшиеся при проведении эксперимента, имеют относительно низкую продольную прочность ввиду отсутствия в конструкции силовых элементов, то для получения трехмерных сейсмоакустических данных было решено использовать наиболее простую модификацию приемного массива в форме цепной линии. Для этого косы были соединены в хвостовой части, а оголовья буксировались при помощи выстрелов. Расстояние между первыми каналами при этом составило порядка 12 метров. Излучатель буксировался по центру судна в 3 метрах за кормой. Схема взаимного расположения элементов приемоизлучающей системы во время проведения полевого эксперимента представлена ниже (Рис. 3.25).

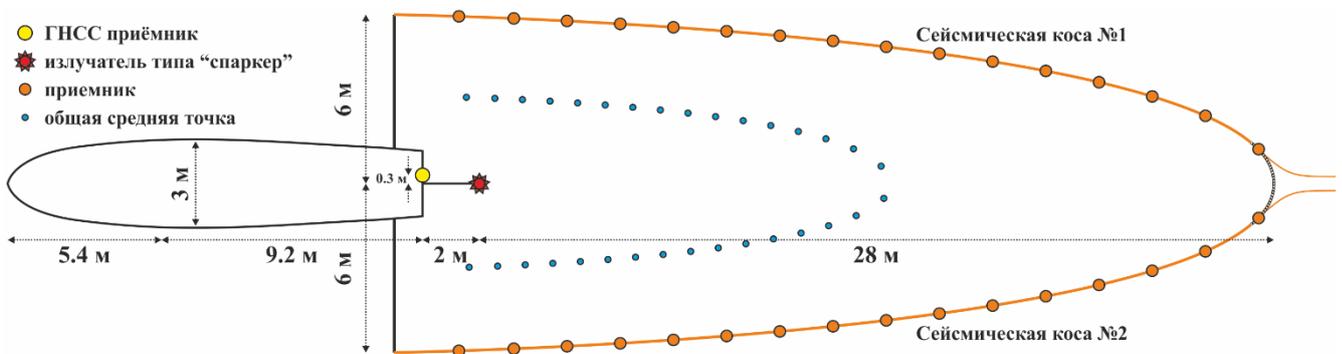


Рис. 3.25: Схема буксировки приемоизлучающего массива во время проведения полевого эксперимента в губе Ругозерская

Внешний вид приемной системы, состоящей из двух соединенных вместе сейсмических кос, во время разворота и спускоподъемных операций представлен на фотографиях (Рис. 3.26). В ходе эксперимента подтвердилось предположение, что приемная система представляет собой цепную линию, сильно вытянутую в направлении движения судна. Во время разворотов судна и при резком изменении курса приемная система сохраняет форму (Рис. 3.26), что дополнительно контролировалось в процессе присвоения геометрии наблюдений на этапе обработки полученных данных.



Рис. 3.26: Приемоизлучающая система во время спускоподъемных операций (слева) и разворота судна (справа) (фото А.А. Вайнштейна)

Для достижения необходимой кратности наблюдений и обеспечения хорошей управляемости судна скорость движения была выбрана равной 3.5 узлам. Среднее расстояние между пунктами возбуждения при частоте импульсов 2 раза в секунду составило 0.625 метра, как это видно из карты распределения скоростей движения судна по профилям (Рис. 3.27). Вариации скорости движения обусловлены в первую очередь сильными приливно-отливными течениями, характерными для губы Ругозерская.

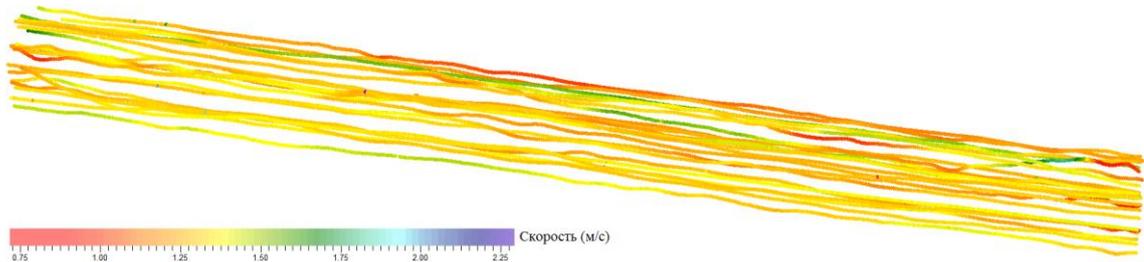


Рис. 3.27: Скорость движения судна на различных профилях съемки

Для анализа шумов буксировки, связанных с буксировкой сейсмической косы под углом, после завершения основной части полевого эксперимента был записан фрагмент сейсмоакустического профиля, при выполнении которого возбуждение упругих колебаний не осуществлялось.

Всего за время проведения съемки было получено 22 профиля общей длиной 16.5 километров. Запись велась с интервалом дискретизации 0.1 мс при длине 200 мс. Амплитуды регистрировались в формате I2. В результате проведенных полевых экспериментов было зарегистрировано порядка 25 000 сейсмограмм общего пункта возбуждения, суммарным объемом 3.2 ГБ.

Описание проведенного эксперимента было опубликовано в работе [Шматков, Токарев, 2014].

3.9. Выводы к главе 3

1. На основе технических и методических требований, сформулированных после рассмотрения теоретических (в главе 1) и практических (в главе 2) аспектов проведения трехмерных сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях, автором заданы целевые показатели новой методики и предложен способ буксировки многоканальных сейсмических кос, удовлетворяющий им;
2. Для получения кондиционных данных при минимальных экономических затратах желательно применение серийно выпускаемых сейсмических кос. При этом, в связи с большими углами подхода отраженных волн, предпочтительно использовать косы с минимальной длиной группы в сейсмическом канале;
3. По результатам рассмотрения характеристик различных источников упругих колебаний автором был сделан вывод, что оптимальным для использования в составе разработанной методики оптимальным является излучатель типа «спаркер»;
4. Высокочастотный состав упругих колебаний и плотная сеть наблюдений приводят к необходимости определения координат элементов приемоизлучающего массива в пространстве и соблюдения их заглубления с точностью в первые десятки сантиметров;
5. Для анализа характеристик разработанной методики автором была написана программа для системы математических вычислений Octave/MATLAB, которая на основе начальных данных, задаваемых пользователем, рассчитывает всю необходимую информацию и представляет ее в графическом и текстовом видах. Также приведены основные формулы для ручного расчета геометрии наблюдений;
6. Автором проведен анализ возможных конфигураций приемоизлучающего массива и выявлены закономерности изменения их характеристик в зависимости от используемого оборудования, условий съемки, параметров движения судна и глубины акватории;
7. Результаты анализа технических и экономических показателей, а также преимуществ и ограничений разработанной методики, дают возможность говорить о том, что она соответствует обозначенным выше требованиям и позволяет получать детальные трехмерные сейсмоакустические данные о строении верхней части донных отложений на мелководных участках акватории при оптимальных временных и финансовых затратах;
8. В главе описана практическая реализация разработанной приемоизлучающей системы, с использованием которой автором были проведены опытно-методические работы в акватории Белого моря. Рассмотрены технические характеристики используемого оборудования и основные параметры съемки.

Глава 4. Разработка усовершенствованного графа обработки данных трехмерных сейсмоакустических наблюдений

Цифровая обработка получаемых данных является необходимым элементом любой методики трехмерных сейсмоакустических наблюдений. Для достижения заданной разрешающей способности важно корректно и обоснованно выбирать соответствующие процедуры и алгоритмы, которые позволят сформировать объемное сейсмическое изображение геологической среды с учетом особенностей исходных данных.

Разработка усовершенствованного графа обработки данных высокоразрешающих трехмерных сейсмических наблюдений началась автором после нескольких научных и производственных проектов, где для изучения строения верхней части донных отложений применялась технология P-Cable 3D. На основе личного опыта проведения набортного контроля качества и обработки получаемых данных были сформулированы требования к графу обработки. Впоследствии он был апробирован при обработке данных, полученных во фьорде Люнген Норвежского моря [Шматков и др., 2014; Шматкова и др., 2015].

Во время проведения обработки трехмерных сейсмоакустических данных, полученных в губе Ругозерская Белого моря, граф был адаптирован для сейсмогеологических условий мелководных акваторий.

4.1. Особенности обработки данных трехмерных сейсмоакустических наблюдений

Обработка трехмерных сейсмических данных по своей природе отличается от обработки двумерных наблюдений. В первую очередь, это связано с нерегулярным распределением сейсмических трасс по площади в случае трехмерных наблюдений, а также с увеличением размерности задачи. Для корректного построения объемного сейсмического изображения необходимо использовать специализированные алгоритмы миграции, которые позволяют учитывать информацию об изменениях распределения скоростей в пространстве [Biondi, 2006]. При обработке данных сейсмоакустических наблюдений для последующего динамического анализа желательно учитывать влияние футпринтов на амплитуду отраженного сигнала по площади наблюдений. Миграционные преобразования и другие процедуры обработки должны при этом максимально сохранять истинное отношение амплитуд.

Граф обработки трехмерных сейсмоакустических данных во многом определяется сейсмогеологическими условиями района исследований и дальнейшими задачами, для решения которых предполагается использовать полученные результаты. Методика съемки, используемое оборудование, гидрометеорологические условия и другие внешние факторы могут приводить к необходимости добавления тех или иных процедур обработки. Поэтому ниже рассмотрены наиболее важные по мнению автора моменты, которые не оказывают значительного влияния на

данные разведочной сейсморазведки, но важны для достижения максимального качества при высокоразрешающих наблюдениях.

Контроль качества присвоения геометрии наблюдений и коррекция удалений

Высокие частоты в спектре регистрируемых сигналов и, следовательно, короткие длины волн требуют детального учета ошибок при вводе геометрии наблюдений. С повышением центральной частоты сигнала возрастают и требования к точности определения положения элементов приемоизлучающего массива. Как правило, корректность рассчитанной геометрии наблюдений можно проверить путем анализа времен регистрации прямой волны, однако при работе на предельном мелководье это не всегда возможно.

Для дальнейшего повышения качества получаемых данных необходимо корректировать значения удалений, поскольку это непосредственно влияет на результат применения кинематических поправок. В настоящее время существуют различные подходы к проведению этой процедуры, но большинство из них основано также на анализе времени первого вступления прямой волны [например, Wardell et al., 2002].

Учет искажения формы импульса при вводе кинематических поправок

При проведении исследований на предельном мелководье и относительно больших удалениях может происходить значительное искажение формы отраженной волны после ввода кинематических поправок. Для улучшения качества данных в этом случае можно порекомендовать применять алгоритмы расчета кинематических поправок без растяжения (*non-stretch NMO*) [например, Biondi, 2013].

Ввод статических поправок

В отличие от двумерной сейсморазведки, на данные которой приливно-отливные течения не оказывают серьезного влияния, соседние линии трехмерной съемки могут быть записаны при различных уровнях воды [Wardell et al., 2002]. Также статические поправки необходимы для учета изменения заглубления источника и приемников вдоль профиля при работе в неблагоприятных гидрометеорологических условиях.

В большинстве систем обработки существуют алгоритмы расчета поверхностно-согласованных остаточных статических поправок, однако при работе на акваториях согласованность выполняется для источника, но не для приемников, которые движутся вместе с косой [Wardell et al., 2002]. В случае одноканальных наблюдений статические поправки могут быть получены путем применения пространственного фильтра к пикировке морского дна.

Одним из способов учета статических поправок для многоканальных сейсмоакустических наблюдений может быть получение информации о положении морского дна из данных высокочастотного профилографа или однолучевого эхолота, работающего параллельно с

многоканальной приемоизлучающей системой. Сейсмические данные при этом сортируются по ОГТ и после ввода кинематических поправок рассчитываются необходимые статические поправки для совпадения со временем регистрации донного отражения по данным профилографа [Gutowski et al., 2002]. Однако применение методики ограничивается углами наклона дна (не более 2.5°) и необходимостью применения дополнительного оборудования.

Другой способ, предложенный в работе [Gutowski et al., 2002], основан на расчете статических поправок не для сейсмограмм ОГТ, а для сейсмограмм ОПВ. Для этого предлагается анализировать времена первых вступлений отражения от поверхности дна до ввода кинематических поправок. Из каждой сейсмограммы ОПВ вычитается линейный региональный тренд, полученный путем линейной регрессии пикировки донного импульса. Полученная разность усредняется поканально в пределах нескольких последовательных выстрелов, и статические поправки применяются к каждому из каналов по отдельности.

Похожий метод, нацеленный на выделение и статистический анализ различных компонент статических поправок, предложен в работе [Wardell et al., 2002]. Ошибочное определение скорости акустических волн в воде может привести к искажению сигнала при вводе кинематических поправок, поэтому авторы предлагают использовать пространственную сглаживающую функцию, применяемую к пикировкам на сейсмограммах общих удалений. Так называемая «компонента ОГТ», которая может быть получена как среднее значение сглаженной пикировки в пределах одной сейсмограммы ОГТ, зависит от морфологии поверхности дна. Статическая поправка за пункт возбуждения будет определяться средним значением остатка от вычитания компоненты ОГТ из исходной пикировки в каждой сейсмограмме ОПВ.

Подавление волн-спутников

Вследствие непрерывного изменения заглублиения приемоизлучающего массива применение деконволюции для учета подобных амплитудно-частотных вариаций не эффективно, поскольку для каждой трассы необходим свой оператор. Для решения этой проблемы хорошо себя зарекомендовали специализированные алгоритмы, нацеленные на подавление энергии нежелательных переотражений от поверхности вода-воздух. В настоящее время на практике применяются подходы, основанные либо на адаптивном вычитании модели волн-спутников с применением согласующей фильтрации [Bocharova, Poluboyarinov, 2011], либо на основе адаптивной рекурсивной фильтрации [Vakulenko et al., 2014]. Однако выбор конкретного метода должен основываться на анализе исходных данных и возможностях используемой системы обработки.

4.2. Граф обработки данных высокоразрешающей трехмерной сейсморазведки на примере съемки во фьорде Люнген (Норвежское море)

Полевые работы проводились с борта НИС «Helmer Hanssen» в мае 2012 года во фьорде Люнген в северной части Норвежского моря, который представляет собой узкий, извилистый и глубоко врезающийся в сушу морской залив со скалистыми берегами к северо-востоку от города Тромсе (Рис. 4.1).



Рис. 4.1: Местоположение района исследований в Норвежском море (А) и детальная схема района работ с картой профилей съемки (Б)

Для получения трехмерных высокоразрешающих сейсмических данных использовалась следующая конфигурация приемоизлучающей системы P-Cable 3D (Рис. 2.17, Рис. 2.18):

1. Число сейсмических кос – 14;
2. Число каналов – 8 с шагом 3.125 метра (всего – 112);
3. Расстояние между сейсмическими косами – 12.5 метров;
4. Источник – пневматическая пушка Mini G.I. объемом 40 дм³ ($\approx 650 \text{ см}^3$);
5. Расстояние между пунктами возбуждения – 6.25 м;
6. Длина записи – 1000 мс;
7. Интервал дискретизации – 0.25 мс.

Всего было получено 12 профилей длиной 12 км, ориентированных параллельно оси фьорда. Плановая ширина покрытия общими глубинными точками для каждого профиля – 80 метров, однако с учетом возможного отклонения судна от линии профиля расстояние между соседними линиями съемки было выбрано равным 50 метров. В результате проведенной в течение суток съемки было получено 15729 сейсмограмм общего пункта возбуждения, суммарным объемом 29 ГБ, на площади 8 км² (12 × 0.7 км).

Наборный контроль качества и предварительная обработка данных осуществлялись автором в программном комплексе RadExPro Professional 2013.1. Дальнейшая обработка проводилась совместно с Шматковой А.А. в программном пакете Prime 3D, при участии специалистов «Яндекс-Терра».

Геологическая характеристика района исследований

В геологическом отношении район исследований располагается на Балтийском щите и скальное основание было сформировано во время каледонского орогенеза. На восточном склоне полуострова Люнген, расположенного западнее фьорда (Рис. 4.1, Б), обнажаются породы вулканического и метаморфического происхождения (нефриты и зеленые сланцы), в то время как его центральная часть представлена габбро и метагаббро [Dahl, Sveian, 2004].

Южнее границ проведенных сейсмических наблюдений в направлении поперечном ориентировке фьорда залегает моренная гряда Люнген-Тромсе, образованная в раннем дриасе (10.5 тысяч лет до н.э.), максимальная мощность которой достигает 50 метров [Plassen, Vorren, 2003].

Район исследований подвергался по меньшей мере 8 различным оледенениям [Dahl, Sveian, 2004], поэтому осадочный чехол представлен ледниково-морскими отложениями (глины, илы) с прослоями осадков, образованными различными гравитационными процессами. В верхней части донных отложений выделяются акустически прозрачные слои с большим количеством покмарок, что может быть связано с наличием газонасыщенных горизонтов или миграцией флюидов [Judd, Hovland, 2007; Шматкова и др., 2015].

Наборный контроль качества данных и предварительная обработка

При проведении трехмерных сейсмических и сейсмоакустических наблюдений контроль качества получаемых данных предпочтительно проводить непосредственно во время съемки. Это позволяет на ранних этапах выявить методические и аппаратные факторы, влияющие на качество получаемых данных. Экспресс-обработка необходима для оперативного построения карты распределения кратности, на основе которой в режиме реального времени могут быть запланированы дополнительные (заполняющие) профили.

На первом этапе осуществлялся визуальный контроль качества получаемых данных, а также рассчитывалась и присваивалась геометрия наблюдений. Сложная форма системы буксировки кос (Рис. 2.17) может быть аппроксимирована цепной линией, вершинами которой являются точки сопряжения перпендикулярного кабеля с буксировочным кабелем. Аналитическое выражение, описывающее форму цепной линии, определяется формулой (40) [Меркин, 1980]:

$$y(x) = \frac{a}{2} \left(e^{\frac{x}{a}} + e^{-\frac{x}{a}} \right) = a \cosh \frac{x}{a}. \quad (40)$$

Для каждой линии съемки подбирались оптимальные параметры цепной линии для точной аппроксимации положения перпендикулярного кабеля и, соответственно, расчета положения приемников в косах. Для проверки корректности присвоения геометрии наблюдений на основе полученных координат приемников и источника рассчитывались удаления для каждого из них,

что, с учетом predetermined скорости распространения упругих колебаний в воде, позволяет рассчитать теоретическое время прихода прямой волны. Визуальное сравнение полученных времен и сейсмограмм общего пункта возбуждения позволяет оценить точность присвоенной геометрии наблюдений и, при необходимости, внести соответствующие изменения.

В связи с нерегулярностью движения судна и наличием боковых течений взаимное расположение элементов приемоизлучающей системы может изменяться на протяжении профиля съемки. Присвоение геометрии наблюдений по алгоритму, описанному выше, не учитывает эти изменения, что приводит к некорректному определению удаления приемника от источника и в дальнейшем может сказаться на качестве сейсмических данных при вводе нормальных кинематических поправок. На этапе коррекции удалений было решено привести их в соответствии с наблюдаемыми значениями. Для этого во временном окне (5 мс), превосходящем возможные погрешности при определении значений удалений, на каждой сейсмической трассе в автоматическом режиме было найдено время первого вступления прямой волны. Полученное время вступления было пересчитано в значение удаления с использованием средней скорости распространения упругих колебаний в воде.

На втором этапе к данным применялись такие процедуры как амплитудная коррекция за сферическое расхождение, полосовая фильтрация, вводились кинематические поправки с постоянной скоростью. После бинирования по сети с ячейкой 6.25×6.25 метров сейсмический куб суммировался, а карты кратности анализировались с целью поиска пропусков в покрытии.

Ввод статических поправок за приливно-отливные течения

Значения приливно-отливных колебаний уровня воды в районе исследований во время проведения работ достигали первых метров (Рис. 4.2), что сопоставимо с длиной волны излучаемого импульса, и, вследствие этого, при суммировании сейсмического куба могут проявиться артефакты (Рис. 4.3, А).

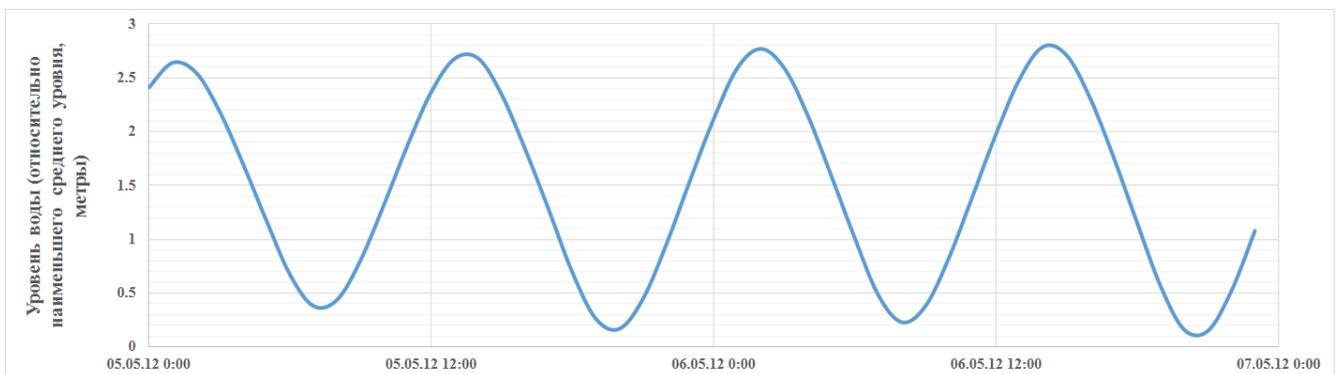


Рис. 4.2: Изменение уровня моря во время проведения полевых наблюдений по данным уровневого поста в порту Тромсе

Несмотря на введенные статические поправки (Рис. 4.3, Б), наблюдаются артефакты, вызванные несоответствием данных о приливно-отливных течениях с береговой станции в Тромсе, к району работ из-за большой удаленности. Последующая корректировка статических поправок на основе статистической информации о времени регистрации донного отражения позволила существенно улучшить суммарный разрез (Рис. 4.3, В).

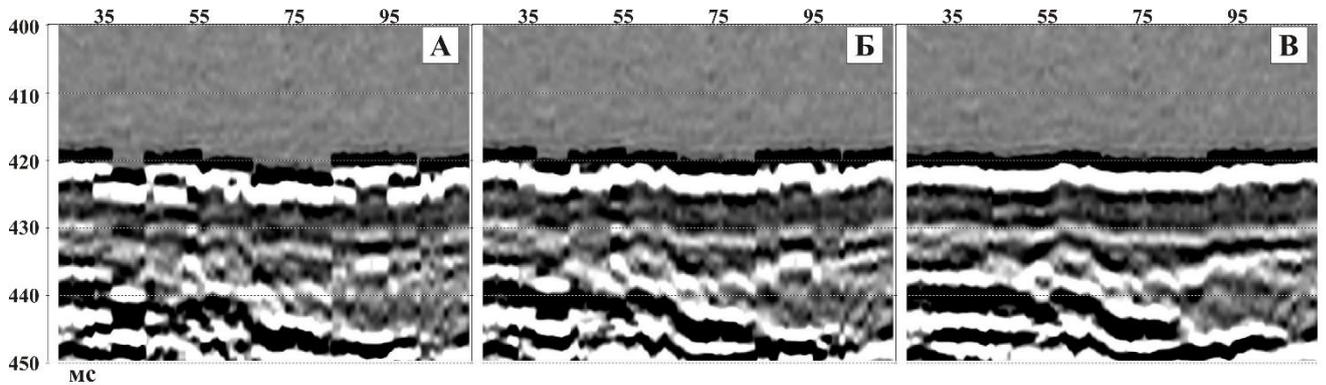


Рис. 4.3: Фрагмент сейсмического куба в поперечном направлении до ввода статических поправок (А), после учета приливно-отливных течений (Б) и после расчета корректирующих поправок (В)

Бинирование

После бинирования по регулярной сети 6.25×6.25 метров была построена карта распределения кратности (Рис. 4.4), на которой наблюдается достаточно сильная вариативность значений, вызванная особенностями методики и параметров системы наблюдений. Дальнейшее использование таких данных для проведения динамического анализа затруднительно, поскольку амплитудные характеристики сигнала будут сильно меняться по площади исследований. Для уменьшения описанного выше эффекта было решено провести регуляризацию данных.

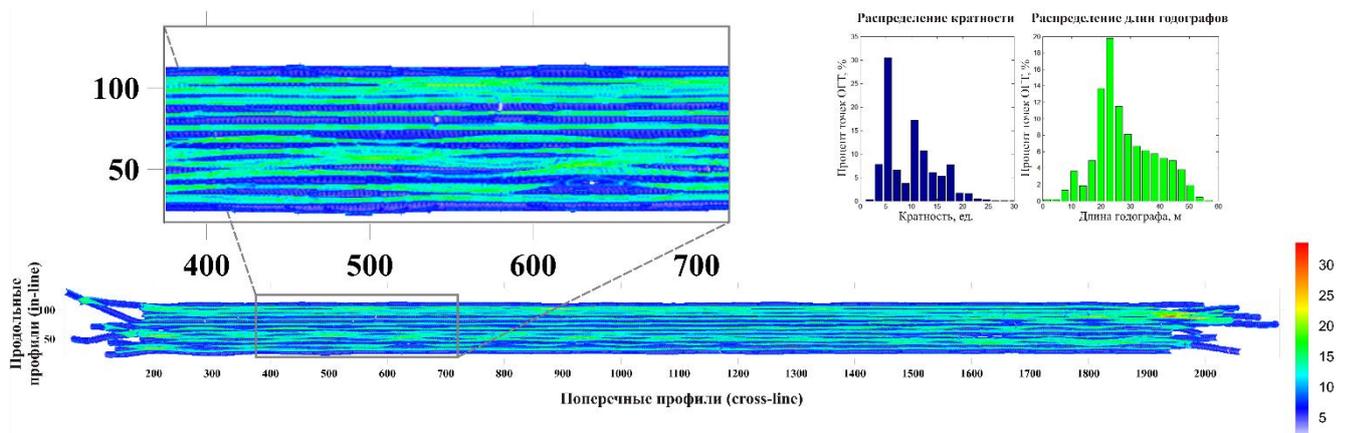


Рис. 4.4: Карта распределения кратности по площади исследований, гистограммы кратности и длины годографа

Регуляризация амплитуд

Процедура регуляризации, реализованная в системе обработки Prime 3D, основана на следующем алгоритме: данные разбивают на пространственно-временные блоки, для каждого из которых находится коэффициент Фурье на регулярной сети наблюдений, соответствующий обратному коэффициенту Фурье на нерегулярной сети. После этого данные переводят во временную область [Xu et al., 2005]. В процессе которой кратность во всех бинах становится одинаковой и соотношение сигнал/шум выравнивается. Также бины с нулевой кратностью интерполируются (Рис. 4.5).

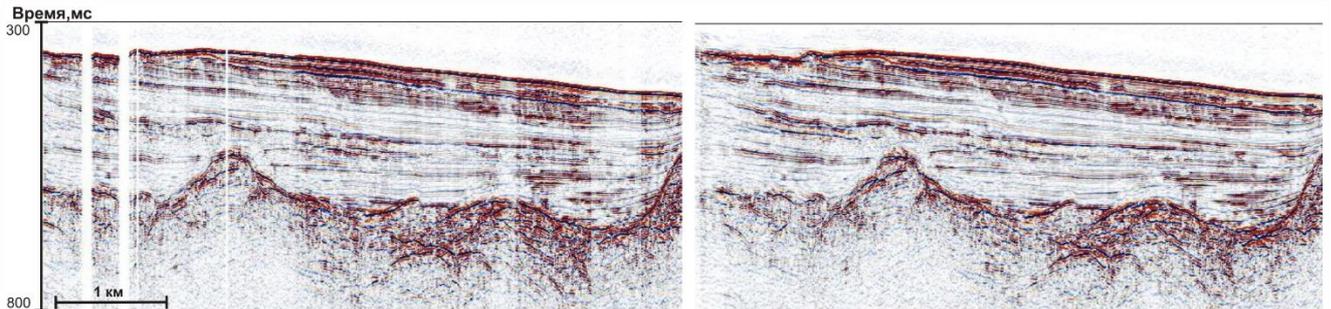


Рис. 4.5: Временной разрез до (слева) и после (справа) регуляризации сейсмического куба

Результаты процедуры регуляризации лучше всего видно на картах среднеквадратичных амплитуд донного отражения (Рис. 4.6) – увеличивается контрастность амплитуд в пределах площади исследований, уменьшаются аномалии, вызванные отпечатками системы наблюдений.

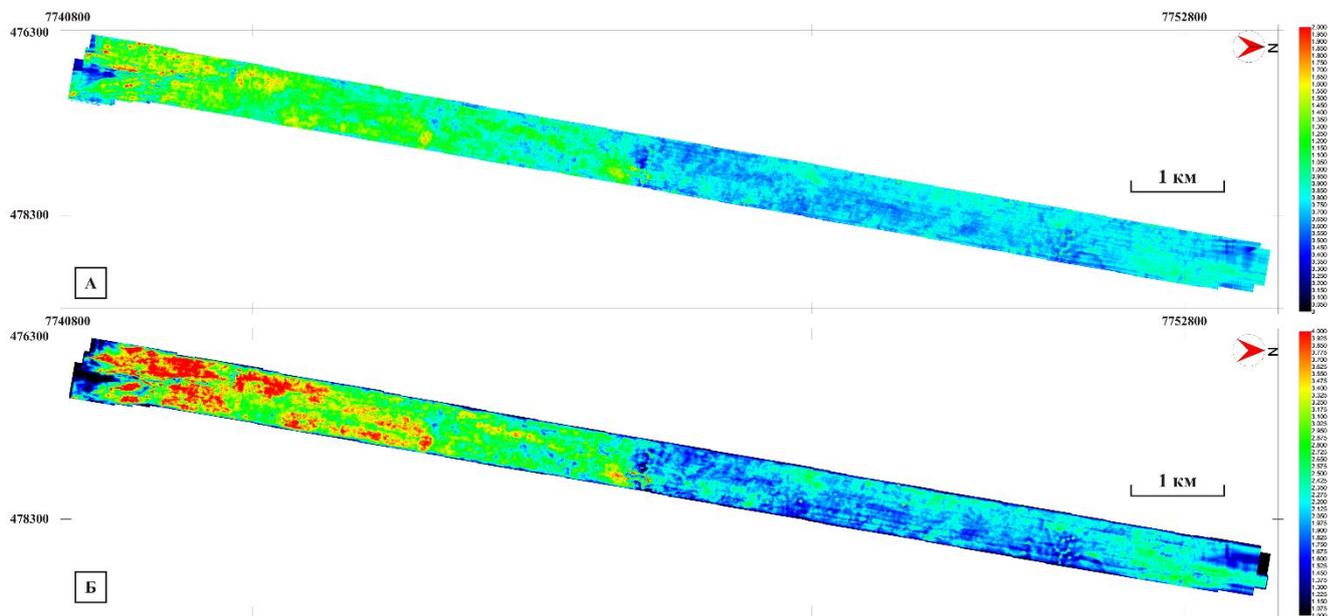


Рис. 4.6: Карта среднеквадратичных амплитуд отражения от дна до (вверху) и после (внизу) регуляризации сейсмического куба

Скоростной анализ

Очевидно, что длина использовавшихся при проведении съемки сейсмических кос (25 метров) и длина годографов (Рис. 4.4), в принципе, недостаточны для точного определения скоростей при глубине воды в 200-300 метров. Однако минимальное удаление при проведении полевых наблюдений было порядка 100 метров. Тем самым скоростной анализ проводится на некотором удалении от t_0 (время регистрации отраженной волны в случае совмещенного источника и приемника) и поэтому его эффективность выше, поскольку разбег годографов от слоев с различными скоростями будет выше, чем в случае годографов, начинающихся с t_0 . Всего было выбрано три горизонта для горизонтального скоростного анализа – отражение от дна, внутри слоистой толщи и по кровле акустического фундамента.

Скорости по горизонтам внутри слоистой толщи и по кровле акустического фундамента (Рис. 4.7) были сильно сглажены, поскольку по коротким годографам скорости суммирования определяются с большими погрешностями. В результате была получена трехмерная глубинно-скоростная модель, которая использовалась в дальнейшем для проведения трехмерной глубинной миграции.

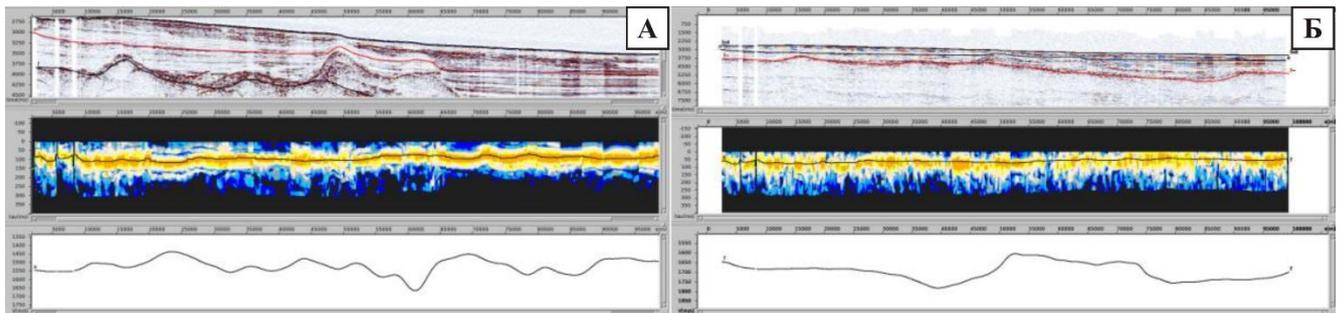


Рис. 4.7: Горизонтальные спектры и значения среднеквадратичных скоростей для горизонта внутри слоистой толщи (слева) и по кровле акустического фундамента (справа)

Результаты построения сейсмического изображения геологической среды

На первом этапе была проведена 2Д миграция продольных профилей сейсмического куба, однако, как видно на приведенном ниже примере (Рис. 4.8, Б), это не позволило существенно улучшить волновую картину и восстановить истинное положение отражающих горизонтов. Поэтому на следующем этапе обработки была выполнена 3Д миграция (Рис. 4.8, В), что позволило получить детальное сейсмическое изображение геологической среды с корректным положением целевых отражающих горизонтов.

Как известно, все алгоритмы миграции в истинных амплитудах опираются на метод продолжения волновых полей, и при этом предполагается, что истинные амплитуды можно сохранить, если сеть приемников и источников достаточно часто и регулярно дискретизирована по всей площади наблюдений. Учесть недостатки реальной системы наблюдений аналитически невозможно, а численно – весьма затруднительно. Компанией «Яндекс-Терра» был разработан

способ численного учета и компенсации недостаточности систем наблюдений и ряда других факторов, осложняющих получение результатов миграции в истинных амплитудах, названный «методом эталонных сейсмограмм» [Фиников, 2012].

Способ заключается в расчете корректирующих множителей, полученных сопоставлением результатов миграции реальных и модельных сейсмограмм, посчитанных в той же глубинно-скоростной модели среды, в которой производится миграция. Корректирующие множители рассчитывают по модельным данным, а применяют их к результатам преобразований данных реальных наблюдений. Формируется результат миграции модельных трасс, при этом сейсмограммы моделируются так, как будто коэффициент отражения от включенных в модель горизонтов равен 1. Если миграция выполнена идеально, то и результирующие амплитуды по всей площади наблюдений должны быть постоянны [Фиников, 2012; Шматков и др., 2014].

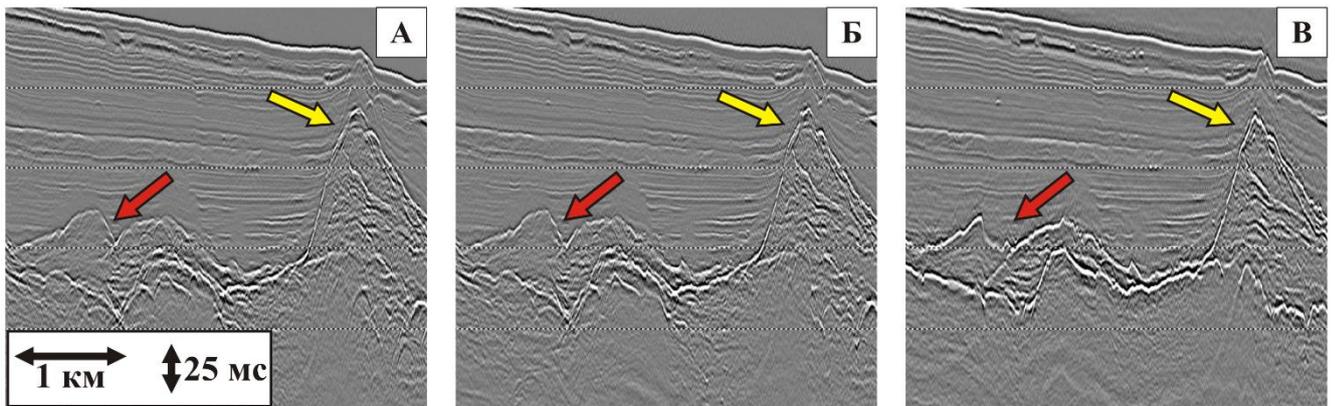


Рис. 4.8: Фрагмент временного разреза до (А), после 2Д (Б) и 3Д миграции (В)

Описанная выше процедура была применена к сейсмическому кубу, полученному при проведении глубинной миграции Кирхгофа после суммирования. Амплитуды были скорректированы с учетом полученных коэффициентов, что в дальнейшем позволило использовать результаты обработки для картирования и идентификации опасных инженерно-геологических явлений и процессов. Ниже представлены краткие результаты интерпретации сейсмического куба.

На батиметрической карте (Рис. 4.9), построенной по данным трехмерных высокоразрешающих наблюдений, отмечается плавное увеличение глубины воды от 230 м (в южной части) до 330 м (в северной), что связано с переходом в более глубинную область (открытое море).

Полученные в результате обработки данные обладают высоким разрешением, что позволяет выделять геологические объекты размером от 7 м по простиранию и от 2 м по вертикали. В верхней части донных отложений были выделены 14 покмарок на севере полигона; уступ, образовавшийся из-за оползания донных отложений в центральной части полигона, и эрозионный врез в южной части полигона (Рис. 4.9).

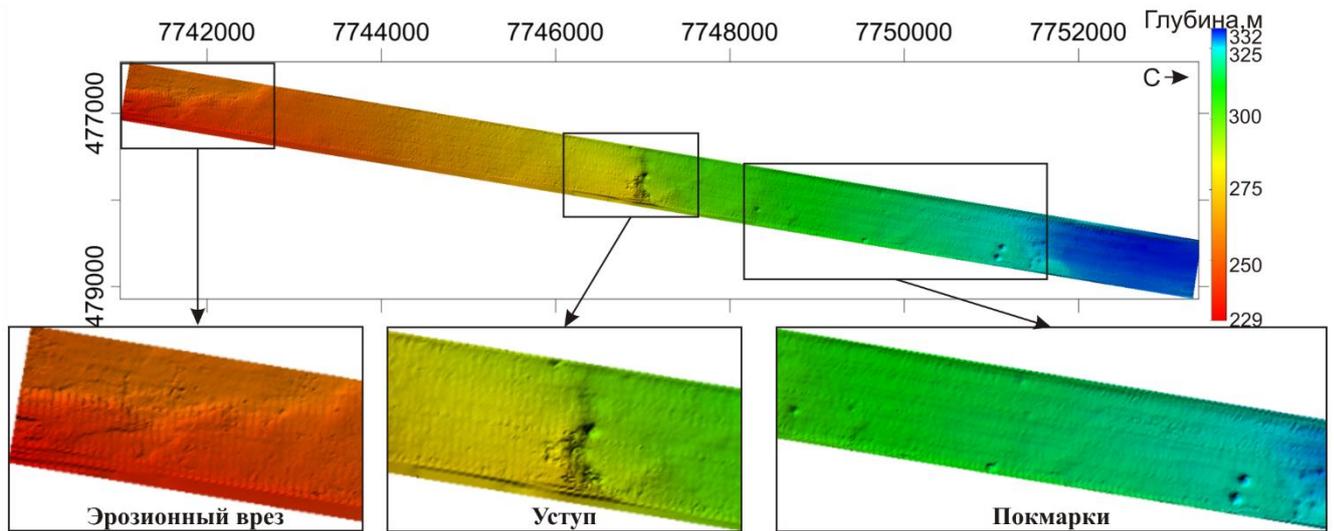


Рис. 4.9: Батиметрическая карта, построенная на основе данных системы P-Cable 3D

В северной части исследуемого полигона также был выделен палеооползень, погребенный под слоем более молодых осадков. Оползень имеет сложное строение — внутри тела наблюдается две поверхности скольжения, что указывает на неоднократное оползание осадков со склона фьорда (Рис. 4.10). Протяженность выделенного объекта составляет 7 км, а максимальная мощность — 130 м. В южной части оползшие осадки заполняют лишь небольшие понижения в фундаменте.

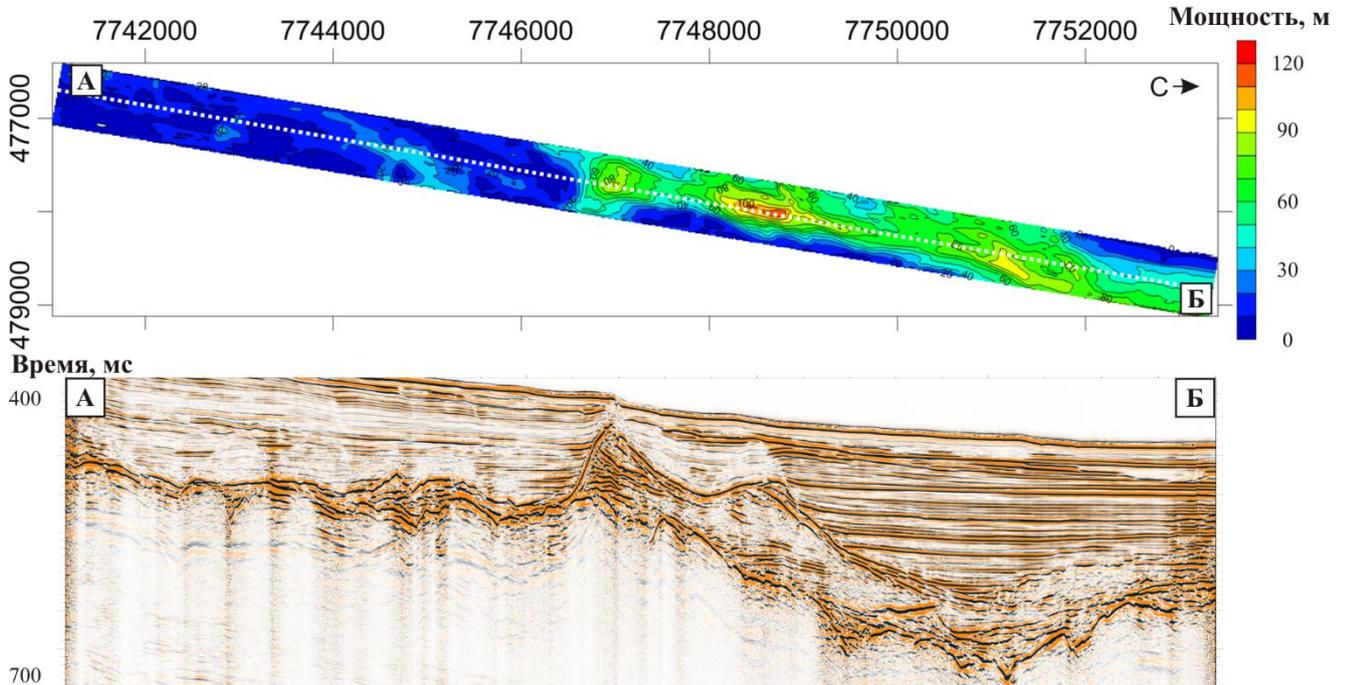


Рис. 4.10: Горизонтальные спектры и значения среднеквадратичных скоростей для горизонта

Подробные результаты проведенных исследований представлены в работах [Шматков и др., 2014; Шматкова и др., 2015].

4.3. **Граф обработки данных трехмерных сейсмоакустических наблюдений на примере съемки в губе Ругозерская (Белое море)**

Обработка данных трехмерных сейсмоакустических наблюдений, проведенных в губе Ругозерская 08 июля 2014 года с использованием разработанной автором методики, выполнялась в программном пакете RadExPro Professional 2015.1. Методика работ и характеристика исходных данных были рассмотрены выше в главе 3.

Геологическая характеристика района исследований

Район исследований расположен в пределах Беломорского блока Балтийского щита. Важнейшей структурной единицей которого в рассматриваемой части Кандалакшского залива является протяженный сложнодислоцированный Лапландско-Беломорский пояс (зона древнейшей архейской складчатости), имеющий северо-западное простирание и представленный комплексом архейских метаморфических пород мощностью 8-10 км, состоящих из кристаллических сланцев, кварцитов, гнейсов и амфиболитов. Этот комплекс получил наименование «беломорского» или «беломорид» из-за его широкого распространения на побережье Белого моря [Невесский и др., 1977].

Осадочный чехол на западном побережье представлен четвертичными морскими и ледниковыми отложениями небольшой мощности (первые десятки метров). Характерной чертой осадкообразования в Кандалакшском заливе явилась зональность распределения осадков, что первоначально было обусловлено сложным рельефом дна и наличием ряда структурных и ледниково-эрозионных ложбин. После разрушения панциря плавающих льдов и активизации гидродинамического режима зональность обострилась вследствие выборочного размыва кровли осадков. Активные дифференцированные тектонические движения отдельных блоков дна в ряде случаев привели к дальнейшему усугублению зональности осадконакопления. Распределение гранулометрических фаций осадков как на поверхности, так и в толще достаточно мозаично. В отдельных впадинах, структурных ваннах и фиардах концентрируются илистые отложения различного генезиса в виде локальных линз значительной мощности. С другой стороны, в областях сужения проливов, на поднятиях дна и на поднятых тектонических блоках сосредоточены маломощные грубозернистые отложения, также на дне могут обнажаться древние ледниково-морские осадки, подвергающиеся размыву [Девдариани, 1985].

Моренные отложения *ледникового комплекса* были сформированы во время Днепровского и Валдайского оледенений. Днепровская морена представлена главным образом супесями и суглинками, реже глинами и содержит в себе обломочный материал преимущественно местного происхождения: граниты, амфиболиты, диабазы, гнейсы и кварциты [Невесский и др., 1977]. Для Валдайской морены характерно высокое содержание песчаной фракции (30-70%), а также равное

содержание алевритисто-глинистой и гравийно-галечной фракций (10-15%). В районе Кандалакшского залива преобладает краевая морена [Спиридонов и др., 1980].

Ледниково-озерные отложения, мощностью до 15-20 метров, широко распространены в районе исследований и слагают прибрежную равнину до абсолютных отметок 70 м. Они представлены главным образом пластинчатыми глинами серого цвета, местами слоистыми, а также суглинками и песками [Спиридонов и др., 1980].

Ледниково-морские отложения (общей мощностью до 20 м) подстилают морские отложения, были сформированы в позднеледниковое время и получили наиболее широкое распространение на дне Кандалакшского залива. Они представлены ленточными слоистыми осадками и сменяются выше монотонными пепельно-серыми глинами и алевроглинами. В ледниково-морских отложениях полностью отсутствуют макроскопические остатки фауны, довольно широко представлена ископаемая диатомовая флора, а также споры и пыльца, позволяющие отнести содержащие их осадки к временным интервалам раннего триаса, аллерда и позднего триаса. Вблизи берегов илы фациально замещаются однообразной, не содержащей макрофауны, толщей песков и алевритов [Невеский и др., 1977; Спиридонов и др., 1980].

Комплекс **морских отложений** имеют полную палеонтологическую характеристику, что позволяет разделить их на комплексы, соответствующие концу бореального, атлантическому, суббореальному и субатлантическому периодам голоцена. В морских отложениях исследуемого района четко выделяются два комплекса. Нижний соответствует максимальному развитию постледниковой трансгрессии, отражает постепенный переход к полностью морским условиям осадконакопления и представлен глинами, алевроглинами с очень низким содержанием песчаных частиц и слабыми фациальными различиями. Верхний соответствует современной морской обстановке. В его отложениях четко прослеживается фациальная зональность [Невеский и др., 1977; Спиридонов и др., 1980].

Предварительная обработка и контроль качества исходных данных

Во время проведения контроля качества анализировались как исходные данные, так и предварительно обработанные, поскольку низкочастотный шум и присутствие постоянной составляющей, характерной для регистрирующей системы, сильно затрудняют проведение соответствующих процедур.

На этапе предварительной обработки были выполнены следующие процедуры:

1. Загрузка данных в проект RadExPro;
2. Ввод статической поправки (1.2 мс), компенсирующей аппаратную задержку ведомой станции (Рис. 3.21);
3. Редакция заголовков сейсмических трасс для корректного присвоения геометрии наблюдений;

4. Удаление постоянной составляющей;
5. Амплитудная коррекция за сферическое расхождение;
6. Полосовая фильтрация (Ормсби, 200-400-3000-3500 Гц);
7. Загрузка информации о приливно-отливных течениях в заголовки сейсмических трасс.

После объединения данных, зарегистрированных различными сейсмическими станциями, в единый массив нумерация каналов была изменена. Канал 1 и 32 соответствуют ближайшим приемникам к точкам буксировки по левому и правому борту соответственно. Каналы 16 и 17 располагаются по центру приемной системы на максимальном удалении от судна.

Первоначальный анализ данных показал, что несколько приемных каналов (12, 17, 20, 23, 27, 28, 29) (Рис. 4.11) не работали, либо их усиление значительно отличалось от других каналов, что привело к уменьшению отношения сигнал/шум. Было сделано предположение, что это может быть вызвано либо неисправностью предварительных усилителей, установленных на каждом канале, либо физическим повреждением системы их питания.

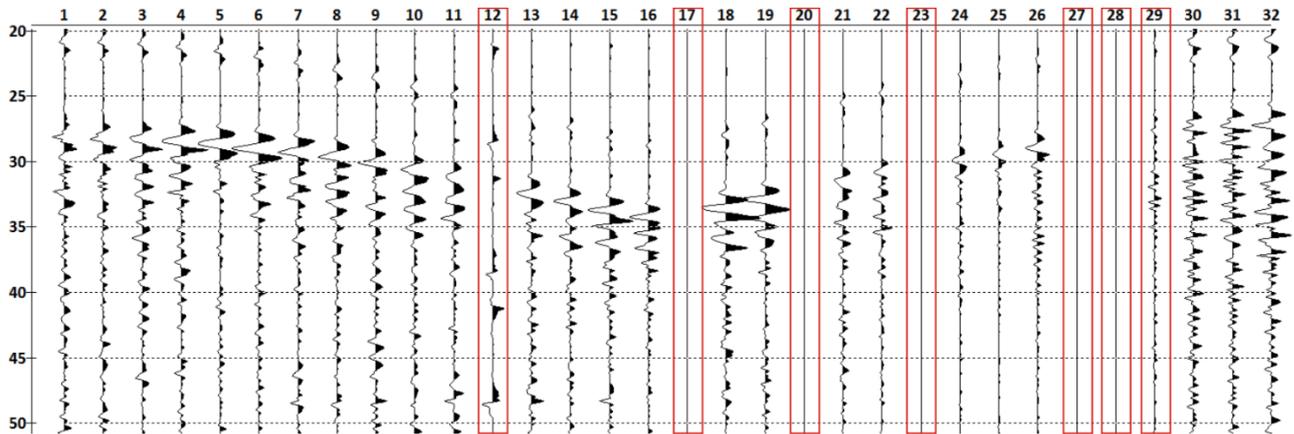


Рис. 4.11: Пример сейсмограммы ОПВ (цветом выделены каналы со слабым усилением)

На данных большинства приемных каналов присутствуют высокоамплитудные короткопериодные помехи, возникшие вследствие резких динамических нагрузок на сейсмическую косу при волнении моря и неравномерной буксировке (Рис. 4.12). Сейсмические трассы каналов 18 и 19 также в значительной степени осложнены зонами низких амплитуд (Рис. 4.13), которые были вызваны периодическим уменьшением заглубления сейсмической косы.

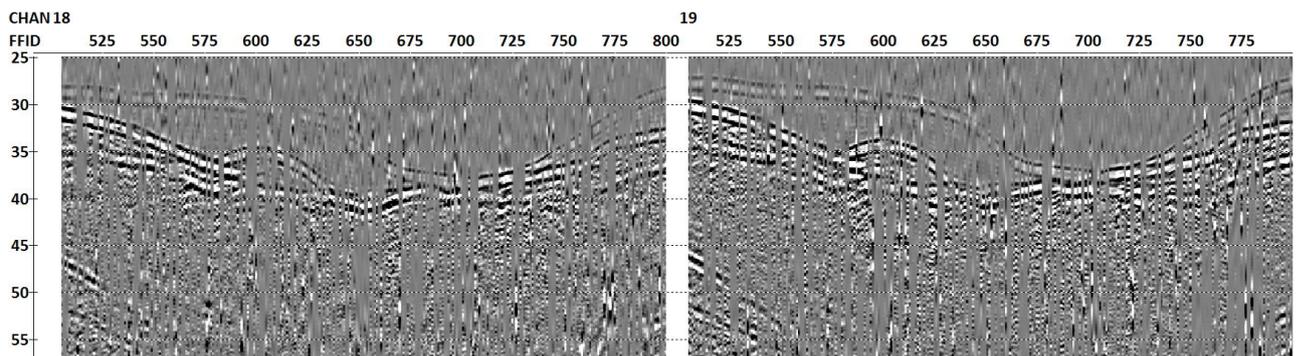


Рис. 4.12: Фрагмент сейсмограмм 18 и 19 каналов с высокоамплитудными помехами

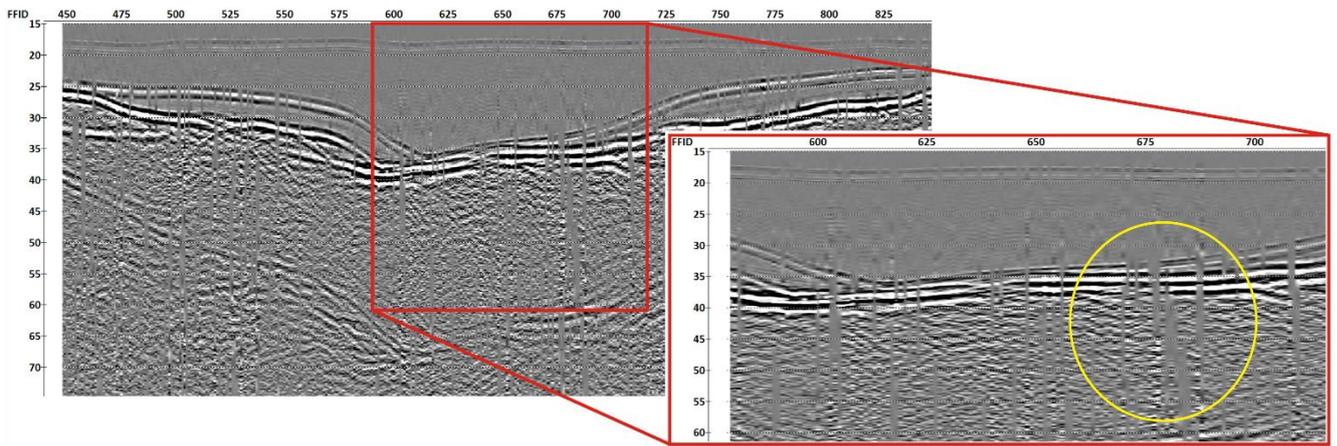


Рис. 4.13: Фрагмент сейсмограммы с низкими амплитудами отдельных участков сейсмических трасс

Анализ шумов буксировки

Для анализа шумов, возникающих при буксировке соединенных вместе сейсмических кос по предложенной методике, после проведения полевых наблюдений было записано 250 сейсмограмм без источника упругих колебаний. Судно при этом двигалось прямолинейно с такой же скоростью, как и при проведении сейсмоакустической съемки, что обеспечило одинаковые условия регистрации данных и шумов от судна.

Первоначальная оценка уровня шумов производилась путем построения графиков среднеквадратичных амплитуд, рассчитанных в окне, равном длине сейсмической трассы (200 мс). Данные предварительно не фильтровались. На графиках значений среднеквадратичного шума (Рис. 4.14) наблюдается неравномерное распределение амплитуд на каждом из каналов, вызванное различной чувствительностью приемных каналов.

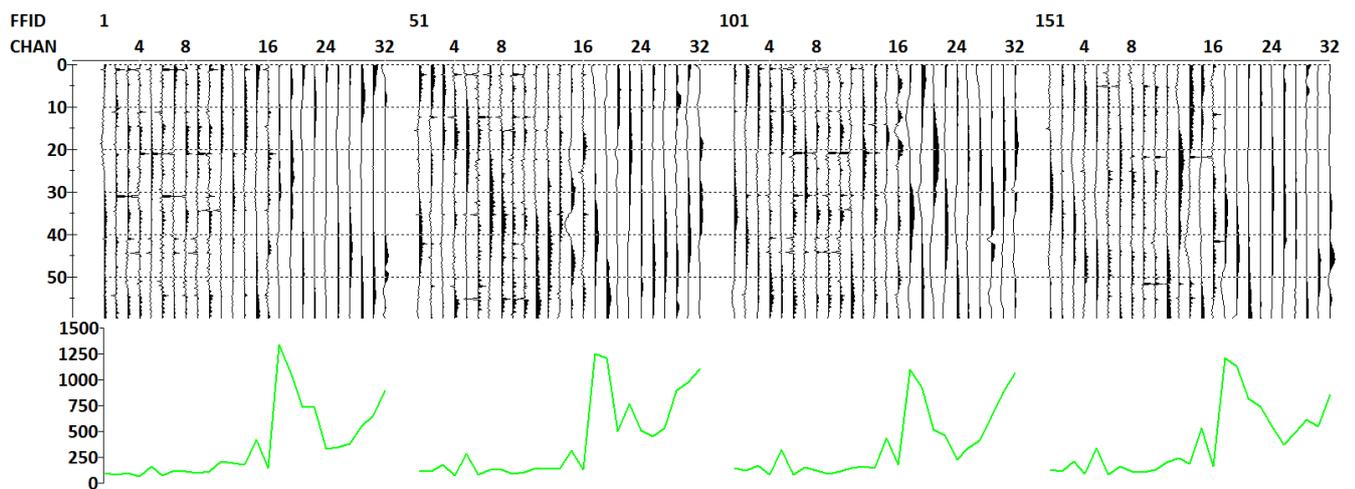


Рис. 4.14: Сейсмограммы ОПВ без возбуждения упругих колебаний и графики среднеквадратичных амплитуд

На каналах 17-32 наблюдается значительный уровень низкочастотных помех. При этом среднеквадратичная амплитуда шума значительно выше, чем на косе с левого борта (Рис. 4.14).

После этого к данным был применен такой же полосовой фильтр, как и на этапе предварительной обработки – 200-400-3000-3500 Гц. Как видно на приведенном ниже примере, в низкочастотной области (Рис. 4.15, А) наблюдается высокий уровень акустических помех. В рабочей полосе частот уровень шумов на всех каналах незначителен (Рис. 4.15, Б).

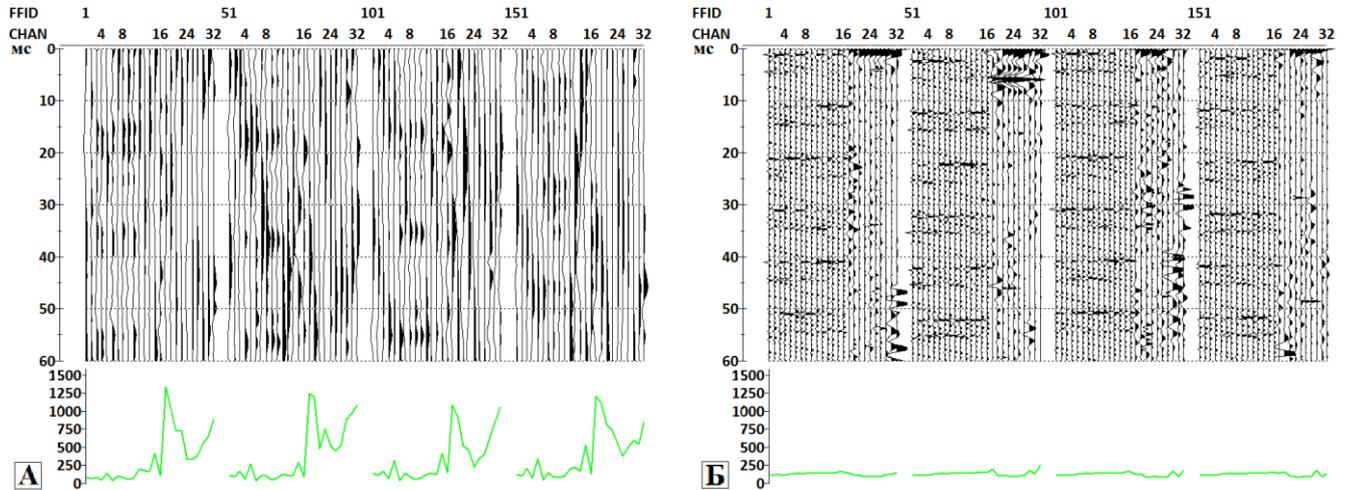


Рис. 4.15: Сейсмограммы ОПВ без возбуждения упругих колебаний и графики среднеквадратичных амплитуд в полосе частот 0-200 Гц (А) и 200-3000 Гц (Б)

В качестве дополнительной проверки было проведено сравнение с данными профильных наблюдений, проведенных с использованием этого же сейсмоакустического комплекса в аналогичных условиях несколькими днями ранее (Рис. 4.16).

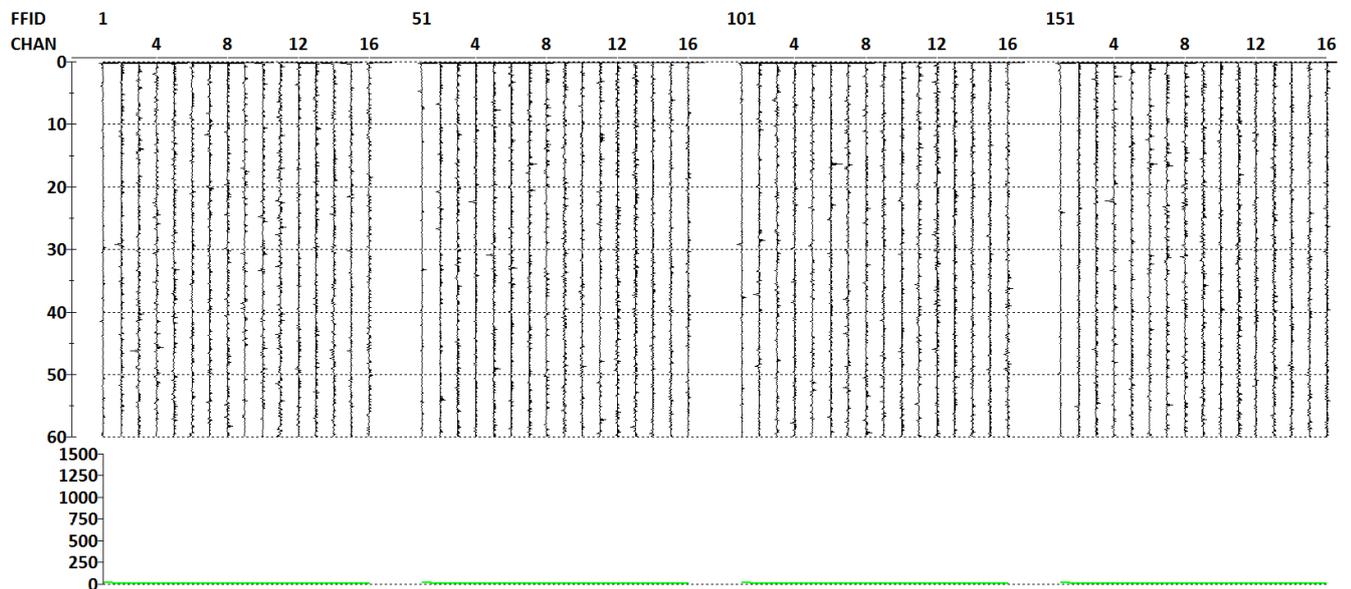


Рис. 4.16: Сейсмограммы ОПВ профильной (А) съемки без возбуждения упругих колебаний и графики среднеквадратичных амплитуд

Расчет и контроль качества геометрии наблюдений, коррекция удалений

Расчет положения элементов приемного массива осуществлялся в предположении, что его форму можно аппроксимировать цепной линией (40). Параметры, определяющие ее форму, подбирали в несколько этапов для каждой линии съемки по отдельности.

После расчета и присвоения геометрии наблюдений было необходимо проверить ее корректность. Для этого было рассчитано фактическое время регистрации прямой волны. Полученные значения были наложены в виде пикировки на сейсмограммы общего пункта возбуждения (Рис. 4.17). Далее проводился визуальный анализ времени первых вступлений прямой волны на сейсмограммах и рассчитанных теоретически. В случае значительного отличия (более 0.5 мс) проводилась корректировка параметров цепной линии, что позволило определить координаты элементов приемного массива с точностью до первых десятков сантиметров. Скорость звука в воде была принята равной 1485 м/с, что согласуется с результатами прямых измерений с использованием датчика STD.

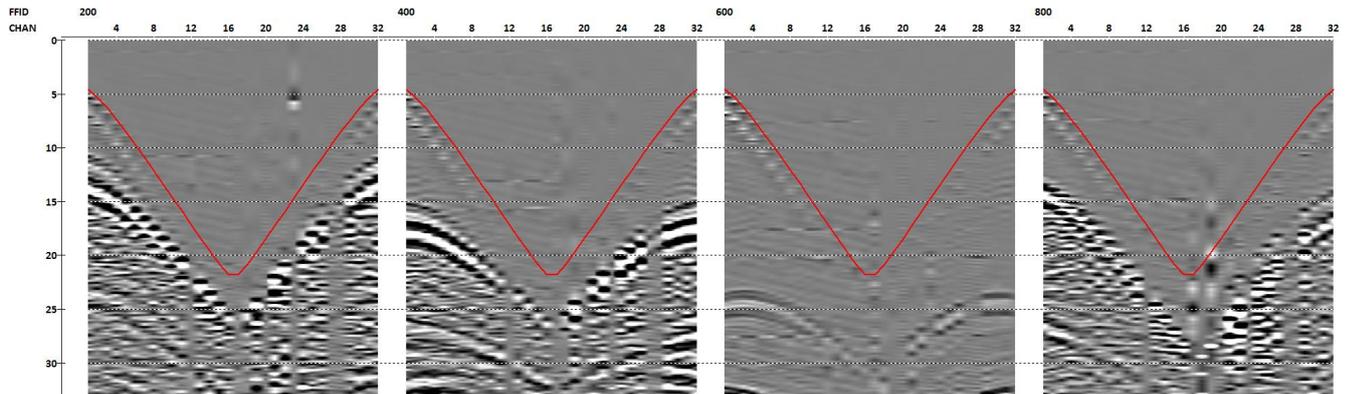


Рис. 4.17: Контроль качества расчета геометрии наблюдений

Поскольку половина профилей выполнялись во встречном направлении, то ошибки абсолютного позиционирования приемоизлучающей системы вдоль оси судна могли привести к сдвигу сейсмических трасс, что негативно сказывается на результатах суммирования. Для проверки корректности рассчитанной геометрии наблюдений были выбраны две сейсмограммы общих удалений, проходящие через одно характерное место геологического разреза. Анализ профилей D2 (канал 16) и С2 (канал 24) показал, что существует погрешность порядка 12 метров (Рис. 4.18, А). После коррекции значений удалось достигнуть лучшего совпадения характерных мест геологического разреза (Рис. 4.21, Б).

В связи с небольшой глубиной буксировки приемоизлучающей системы прямая волна прослеживается только на части приемных каналов. Поскольку алгоритмам коррекции удалений необходима информация о времени первых вступлений отраженной волны, то проведение этой процедуры было затруднительно и не проводилось.

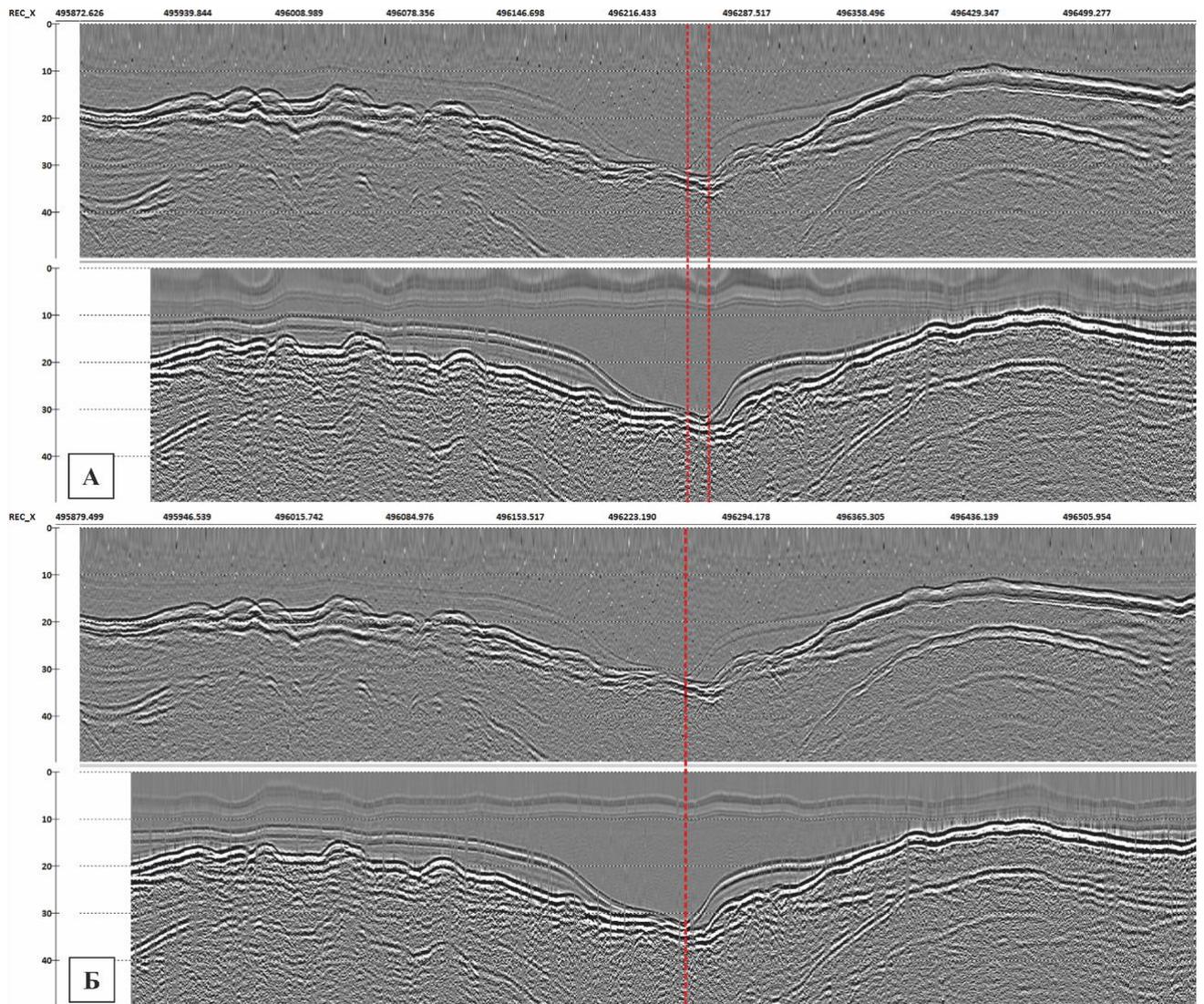


Рис. 4.18: Сравнение характерных форм рельефа отложений на сейсмограммах общих удалений профилей съемки D2 и C2 до (А) и после (Б) коррекции геометрии наблюдений

Бинирование и анализ карт кратности

Для достижения заданной горизонтальной разрешающей способности бинирование полученных трехмерных сейсмоакустических данных проводилось по равномерной сети с шагом 0.5×0.5 метра. На карте (Рис. 4.19) и гистограмме (Рис. 4.20) распределения кратности хорошо видна сильная изменчивость значений по площади наблюдений. Зоны нулевой кратности сформировались из-за неточного соблюдения плановых профилей съемки во время проведения полевых работ. В то же время хорошо заметны протяженные зоны аномально высоких значений кратности (более 10), которые образовались вследствие повторного прохождения судна по одному и тому же профилю.

Также на карте распределения кратности видно, что в центре приемоизлучающей расстановки присутствуют бины с нулевой кратностью (Рис. 4.19, первый профиль съемки снизу). Это объясняется формой приемной системы (Рис. 3.25), так как в центре расстановки расстояние между приемниками в поперечном направлении увеличивается.

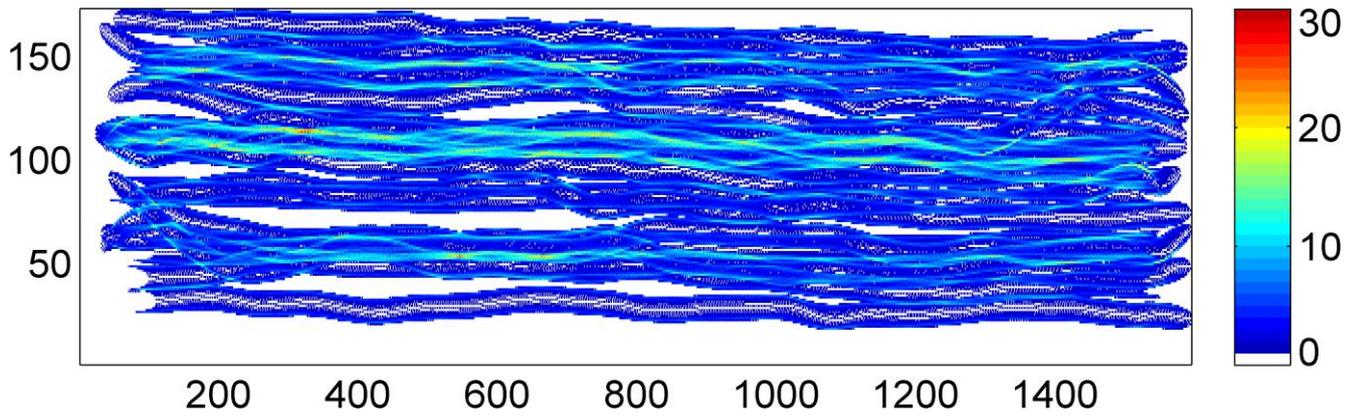


Рис. 4.19: Карта распределения кратности (размер бина 0.5×0.5 м)

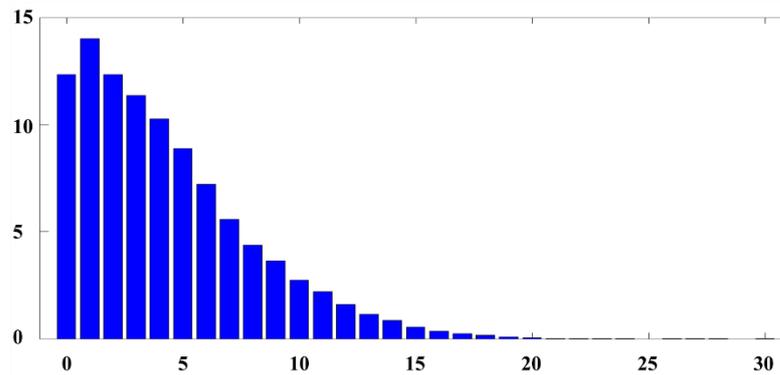


Рис. 4.20: Гистограмма кратности (в полнократной зоне)

Компенсация амплитудно-частотных эффектов, вызванных волнением моря

Для подавления высокоамплитудных помех могут использоваться различные алгоритмы, основанные на статистической оценке амплитуд в скользящем окне, однако получаемые результаты сильно зависят от качества исходных данных и существует большая вероятность искажения формы сигнала. Более эффективным средством для борьбы с этим типом помех является фильтрация в частотно-временной области (TFD, time-frequency domain). За последние несколько лет различные варианты этой методики нашли широкое применение при обработке морских сейсмических данных. Алгоритм фильтрации изложен, например, в работе [Elboth et al., 2010]. Для каждой трассы сейсмограммы в заданном временном окне рассчитывается амплитудный спектр, при этом ширина временного окна определяет количество частотных отсчетов, на которые разбивается амплитудный спектр. После этого по заданному набору трасс для каждого частотного отсчета рассчитывается медианное значение и сравнивается с заданным пороговым значением. Если значение на текущем отсчете превышает пороговое значение, то оно заменяется медианным значением, рассчитанным по набору трасс. Дополнительным эффектом применения фильтрации в частотно-временной области является подавление низкочастотных помех, вызванных волнением моря [Elboth et al., 2010].

Параметры фильтрации подбирались таким образом, чтобы минимизировать искажение формы полезного сигнала (Рис. 4.21).

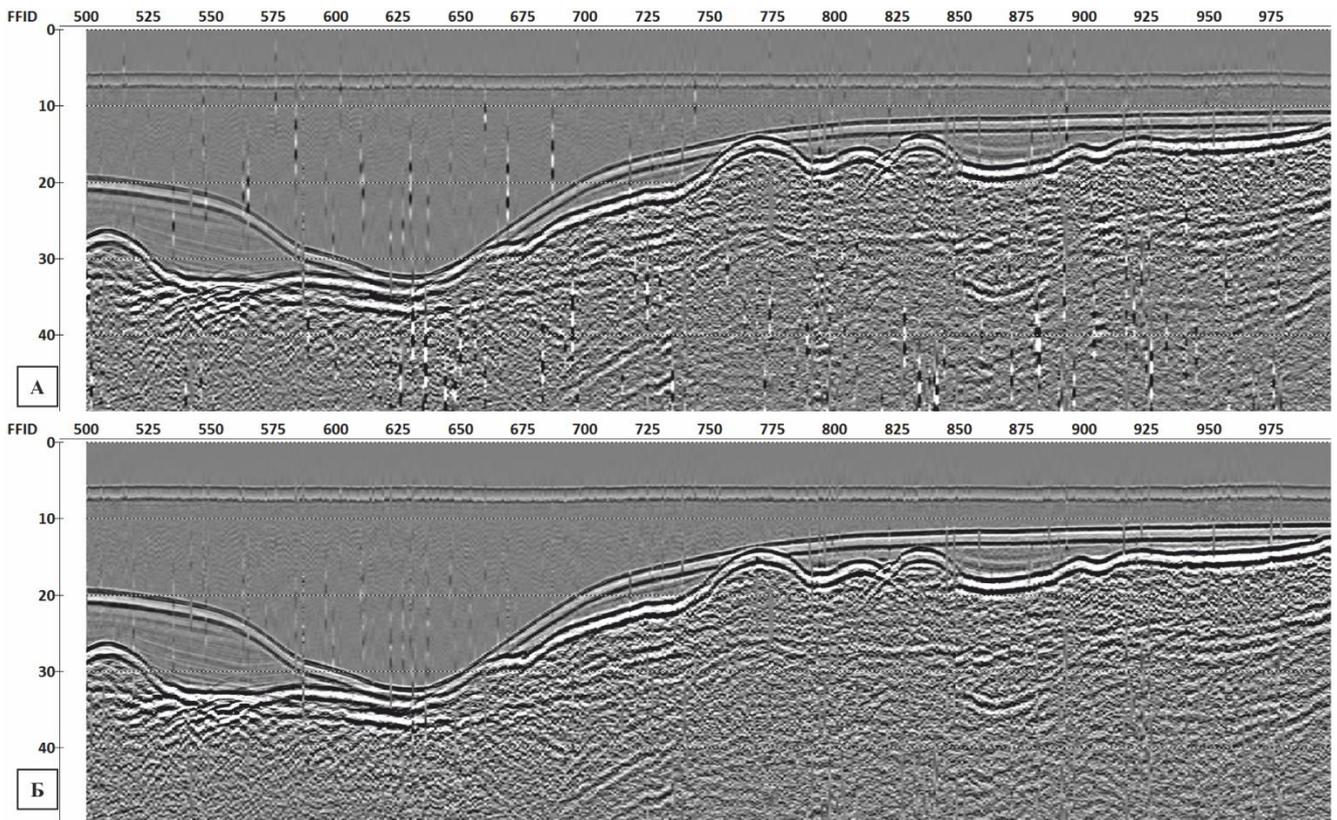


Рис. 4.21: Фрагмент продольного профиля до (А) и после (Б) фильтрации в частотно-временной области

Поскольку центральная частота источника составляла порядка 700-750 Гц, то для достижения оптимального согласования сигнала было необходимо буксировать источники и приемники на глубине порядка 50-55 см. Несмотря на то, что во время проведения съемки волнение моря было минимальным, методика буксировки кос и особенности судна привели к различному заглублению элементов приемоизлучающей системы как в пределах одного профиля, так и на соседних линиях съемки. Вследствие этого форма импульсов на каждом из каналов сейсмоакустических кос различная (Рис. 4.22).

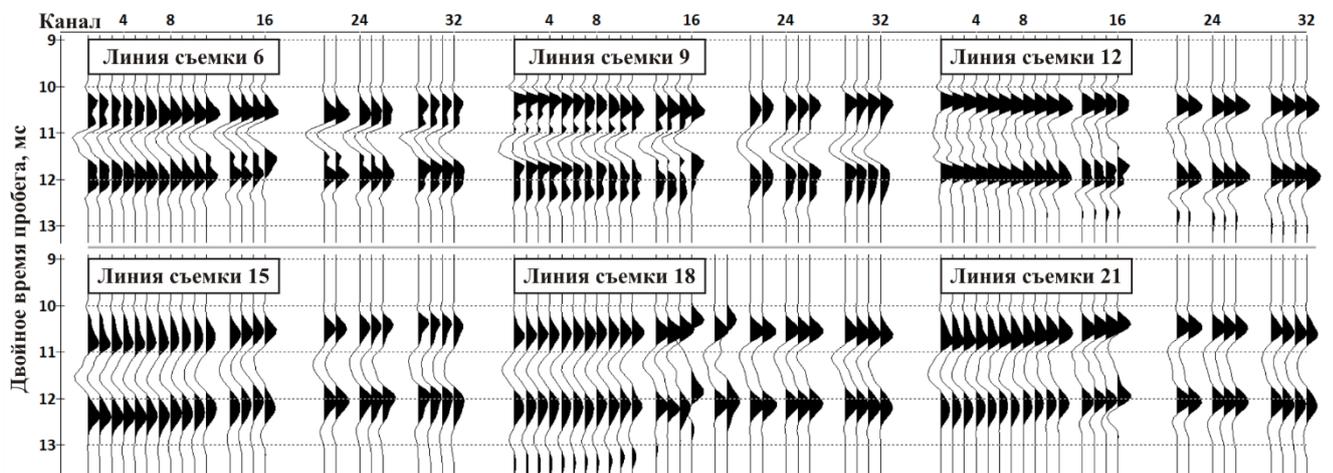


Рис. 4.22: Форма сигнала волны, отраженной от поверхности дна, на различных линиях съемки

Анализ амплитудных спектров донного отражения на различных профилях съемки (Рис. 4.23) показал, что частотные характеристики всех приемных каналов в значительной степени похожи, что свидетельствует о равномерности заглубления приемной системы при проведении полевых наблюдений. Заметно незначительное изменение амплитудных спектров на различных линиях съемки, что могло быть вызвано изменением заглубления приемоизлучающей системы в связи с вариациями скорости движения судна относительно поверхности воды.

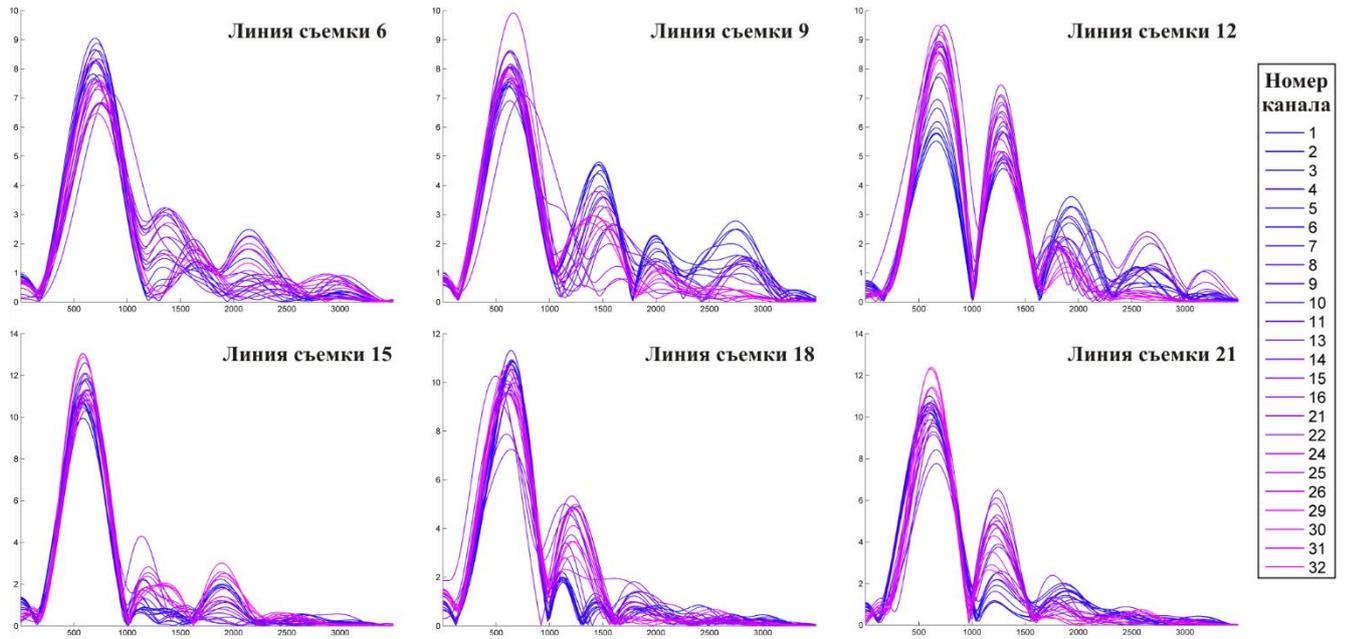


Рис. 4.23: Амплитудные спектры донного отражения на различных линиях съемки

Для приведения данных всех сейсмических каналов к единой форме было решено уменьшить влияние волн-спутников. Для этого был выбран метод, предложенный в работе [Vakulenko et al., 2014], как более эффективный и с большей скоростью вычислений, что является преимуществом при работе со значительным объемом данных до суммирования. Это также позволило повысить вертикальное разрешение полученных данных (Рис. 4.24).

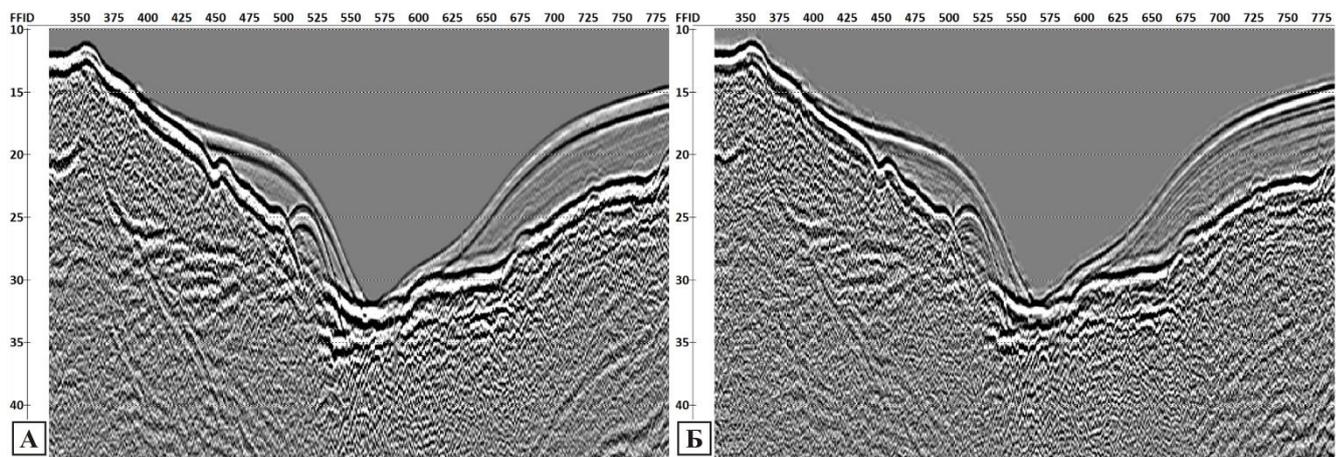


Рис. 4.24: Фрагмент сейсмограммы до (А) и после (Б) применения адаптивной рекурсивной фильтрации

Учет статических поправок

Для учета приливно-отливных течений, амплитуда которых в момент проведения полевых наблюдений составляла более 1 метра, необходимо было ввести статические поправки. В первую очередь это необходимо для увязки продольных и поперечных профилей, а также получения качественных временных срезов сейсмического куба.

На первом этапе они рассчитывались из данных теоретически предсказанных приливов для района ББС МГУ. Для этого в заголовки сейсмических трасс были загружены значения уровня воды и пересчитаны в двойное время пробега со скоростью звука в воде.

Для независимой проверки предсказанных значений уровня воды было решено применить метод, предложенный в работе [Wardell et al., 2002]. Значения времени первых вступлений (Рис. 4.25, А) сглаживались в широком пространственном окне с целью определения трендовой поверхности (Рис. 4.25, Б). После этого полученная поверхность вычиталась из исходных данных (Рис. 4.25, В) и находилось среднее значение поправки для каждой линии съемки по отдельности (Рис. 4.25, Г). Для расчетов использовалась часть полученного сейсмоакустического куба – 600 поперечных профилей и 120 продольных.

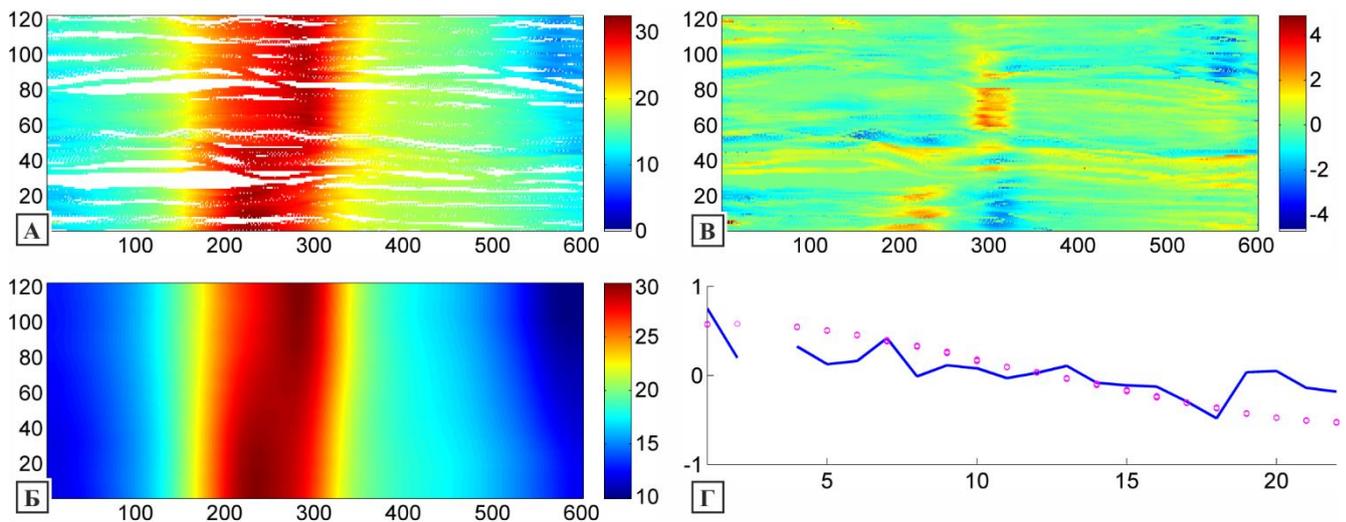


Рис. 4.25: Пикировка отражения от морского дна (А), сглаженная пикировка (Б), разница между ними (В) и сравнение предсказанных значений уровня воды (Г, фиолетовые круги) с рассчитанными (Г, синяя линия)

На приведенном ниже примере хорошо видно, что на продольных профилях существуют невязки между соседними трассами (Рис. 4.26, А). После ввода статических поправок за приливно-отливные течения величина невязок значительно уменьшается (Рис. 4.26, Б). Распределение амплитуд на временном срезе также становится более равномерным и становится возможным выделение протяженных границ (Рис. 4.27).

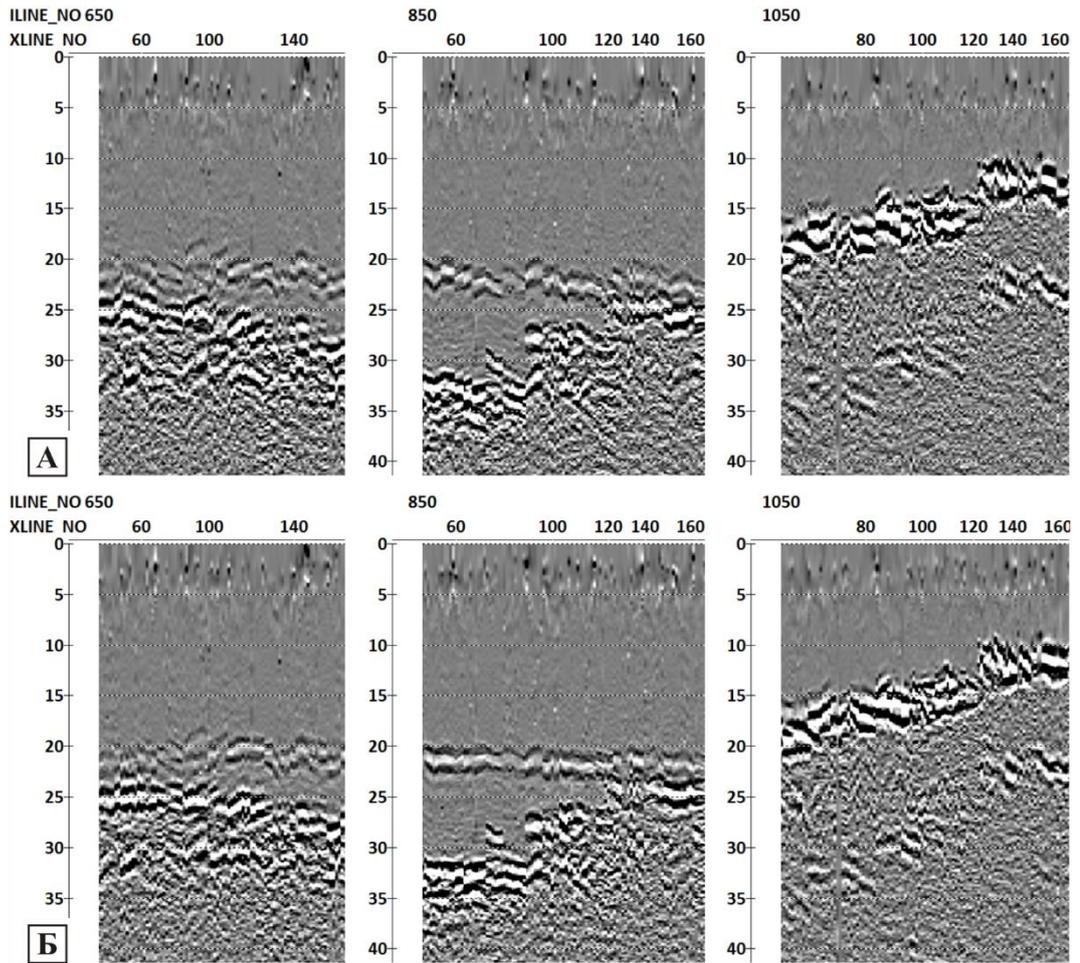


Рис. 4.26: Пример поперечных профилей сейсмического куба до (А) и после (Б) ввода статических поправок

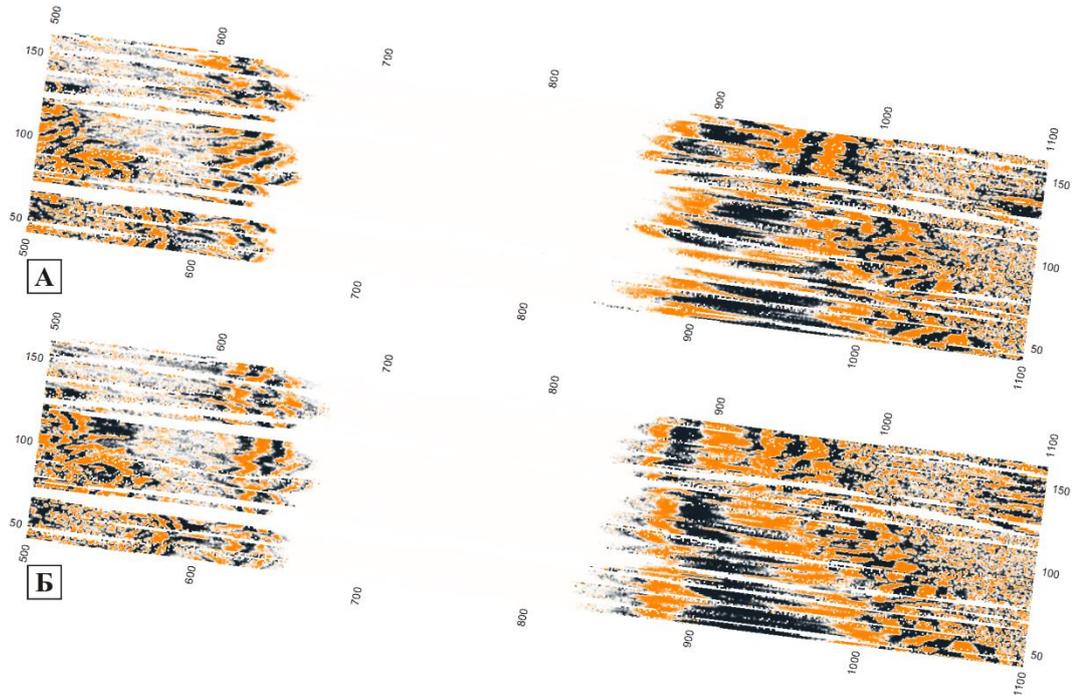


Рис. 4.27: Временной срез сейсмического куба до (А) и после (Б) ввода статических поправок

Анализ полученного сейсмического изображения геологической среды

В связи с небольшой глубиной воды в районе исследований часть сейсмических трасс оказалась подвержена эффекту растяжения сигнала при вводе кинематических поправок. Поэтому для детального анализа и получения сейсмического куба был выбран наиболее представительный участок в центральной части исследуемого полигона – продольные профили 42-164, поперечные профили 500-1100 (Рис. 4.28).

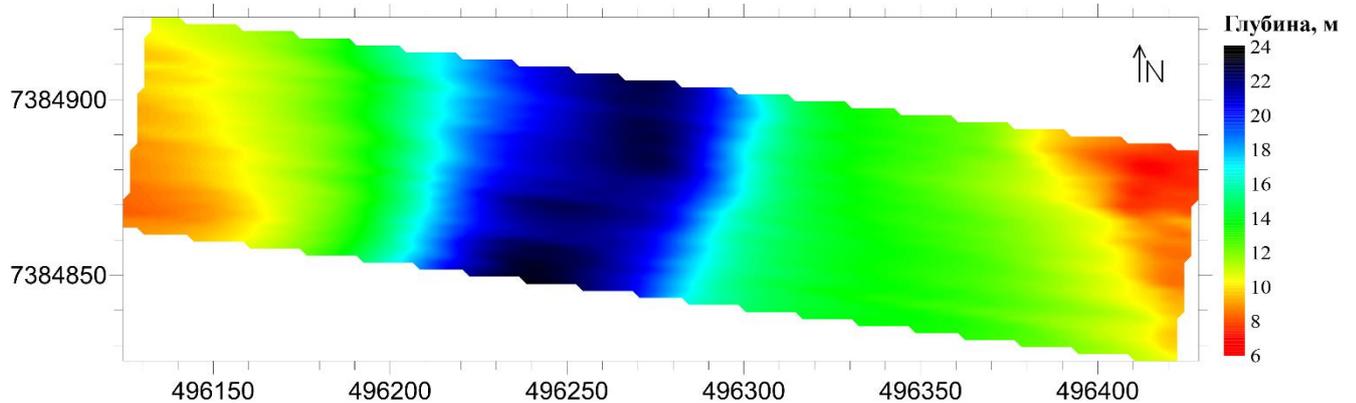


Рис. 4.28: Батиметрическая карта, построенная по данным трехмерной сейсмоакустической съемки

В связи с небольшой мощностью осадочного чехла в районе исследований (первые десятки метров) и незначительными отличиями скоростей продольных волн (в водной толще и осадках) при суммировании использовалась постоянная скорость – 1485 м/с. Пример полученного в результате обработки сейсмического куба приведен ниже (Рис. 4.29).

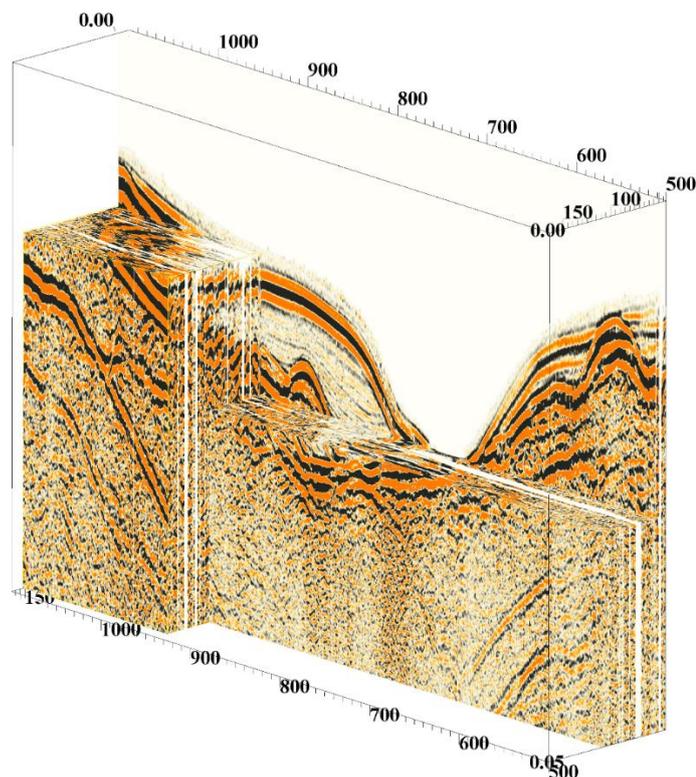


Рис. 4.29: Объемное изображение сейсмического куба, полученного в результате обработки

Перед проведением интерпретации также была проведена интерполяция сейсмического куба и трехмерная миграция Кирхгофа после суммирования.

В процессе интерпретации полученного сейсмического куба было выделено три сейсмостратиграфических комплекса (Рис. 4.30):

1. Акустический фундамент;
2. Моренные отложения;
3. Современные морские осадки.

При построении карты мощности моренных отложений использовалась скорость продольных волн 1800 м/с, донных отложений – 1500 м/с.

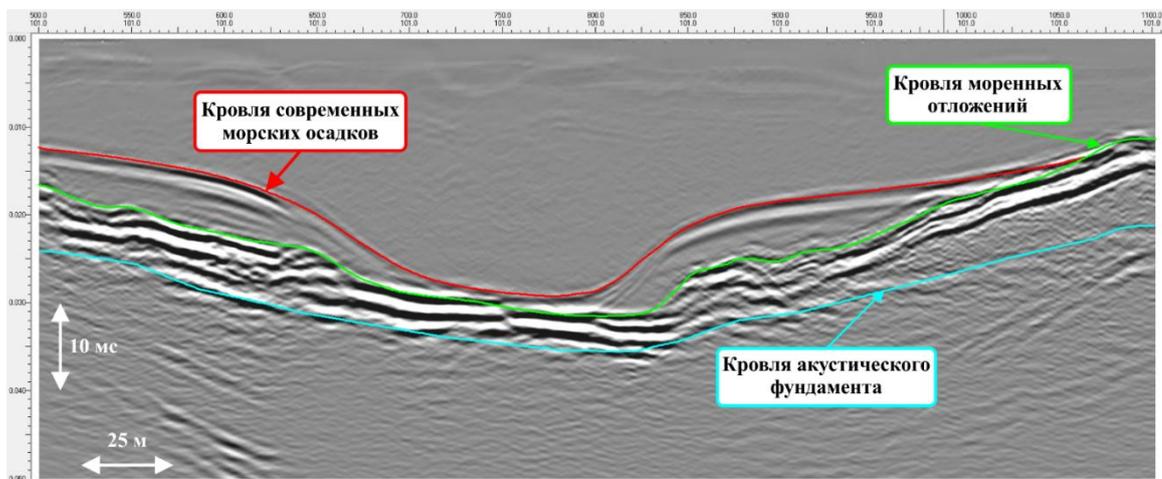


Рис. 4.30: Пример выделения отражающих горизонтов (продольный профиль 101)

Кровля акустического фундамента имеет понижение, ось которого направлена на север, в центральной части полигона (Рис. 4.31), что определяет рельеф других сейсмостратиграфических комплексов.

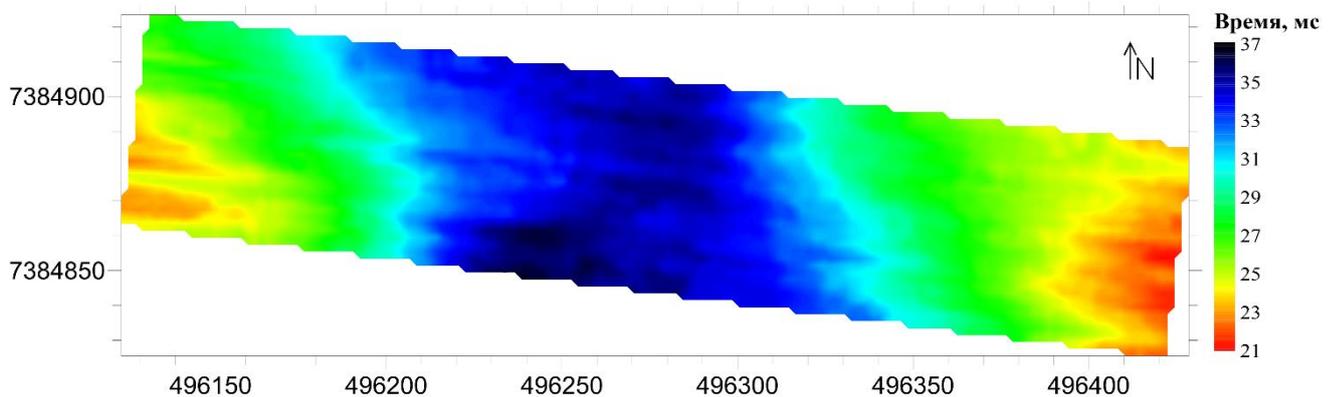


Рис. 4.31: Карта изохрон кровли акустического фундамента

Выше акустического фундамента залегают моренные отложения. Для них характерен хаотический тип сейсмической записи и кровля формирует высокоамплитудное отражение. В рельефе (Рис. 4.32) и на карте мощности моренных отложений (Рис. 4.33) выделяется протяженная линейная зона, параллельная оси центрального понижения. По морфологии и

характеру пространственного распространения этот вал можно интерпретировать как озовую гряду, сформированную отложениями потоков внутри ледника, мощностью до 10 метров. В восточной и западной частях полигона мощность моренных отложений увеличивается, формируя положительные формы рельефа морского дна.

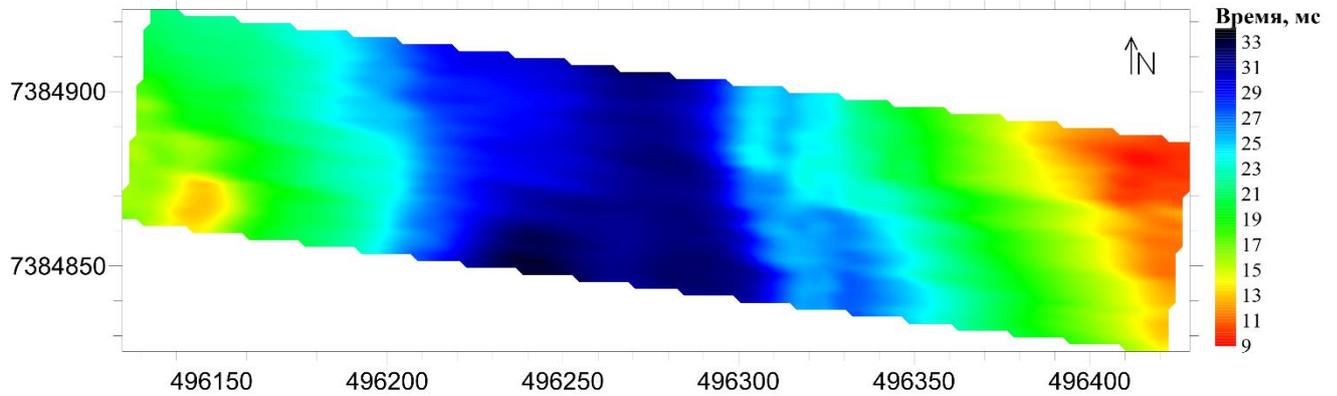


Рис. 4.32: Карта изохрон кровли моренных отложений

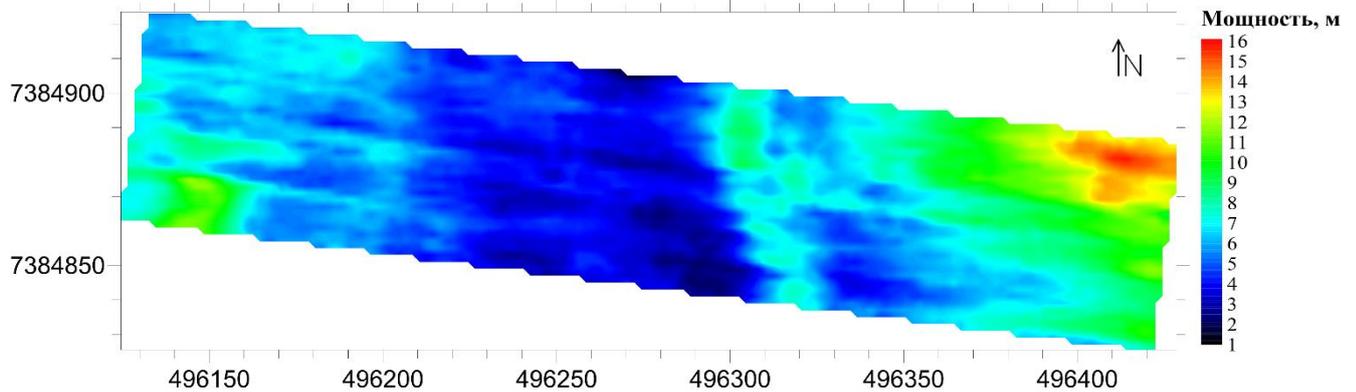


Рис. 4.33: Карта мощности моренных отложений

Современные морские осадки заполняют понижение в рельефе и распространены повсеместно (Рис. 4.34). В северо-восточной части полигона их мощность уменьшается до минимальных значений. Вероятно, это связано с их активным размывом приливно-отливными течениями, характерными для губы Ругозерская. Поэтому на поверхность морского дна выходят моренные отложения.

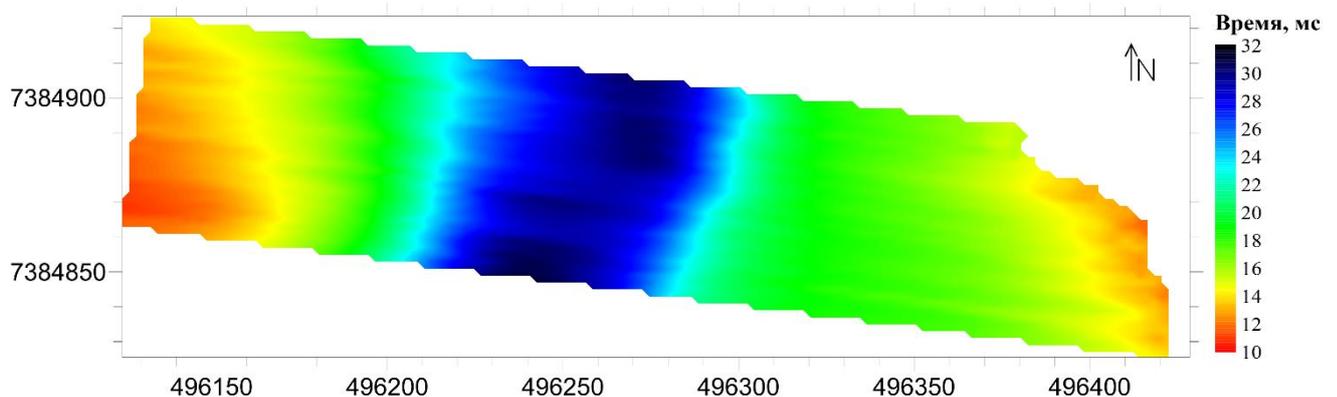


Рис. 4.34: Карта изохрон кровли современных морских осадков

Мощность современных морских осадков неравномерна по площади (Рис. 4.35). Максимальные значения (до 12 метров) наблюдаются на восточном борту центрального понижения рельефа и в северо-западной части полигона.

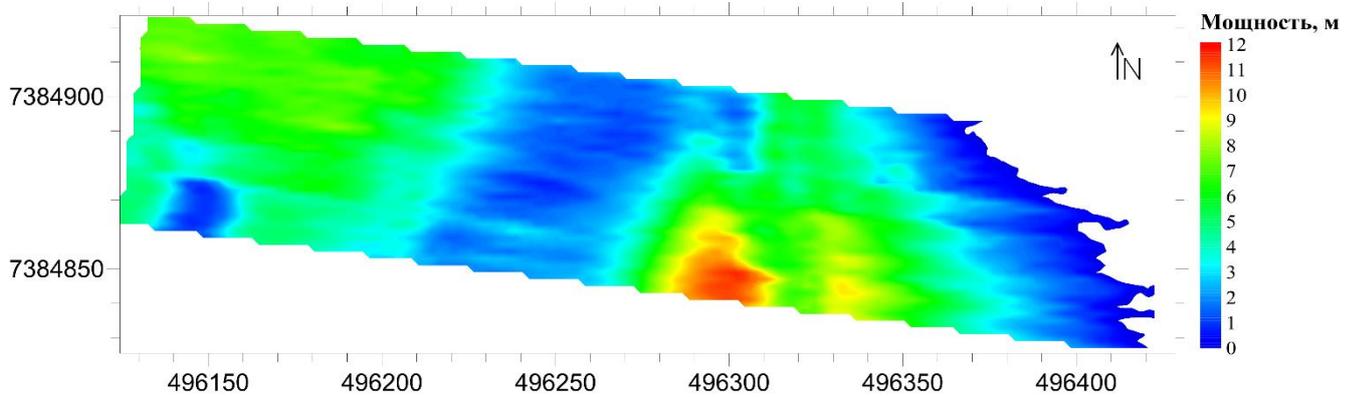


Рис. 4.35: Карта мощности современных морских осадков

В результате проведенной интерпретации была построена трехмерная модель распространения осадков в пределах исследуемого полигона (Рис. 4.36). Благодаря специализированному графу обработки было достигнуто разрешение в первые метры, что позволило выделить области распространения осадков по площади.

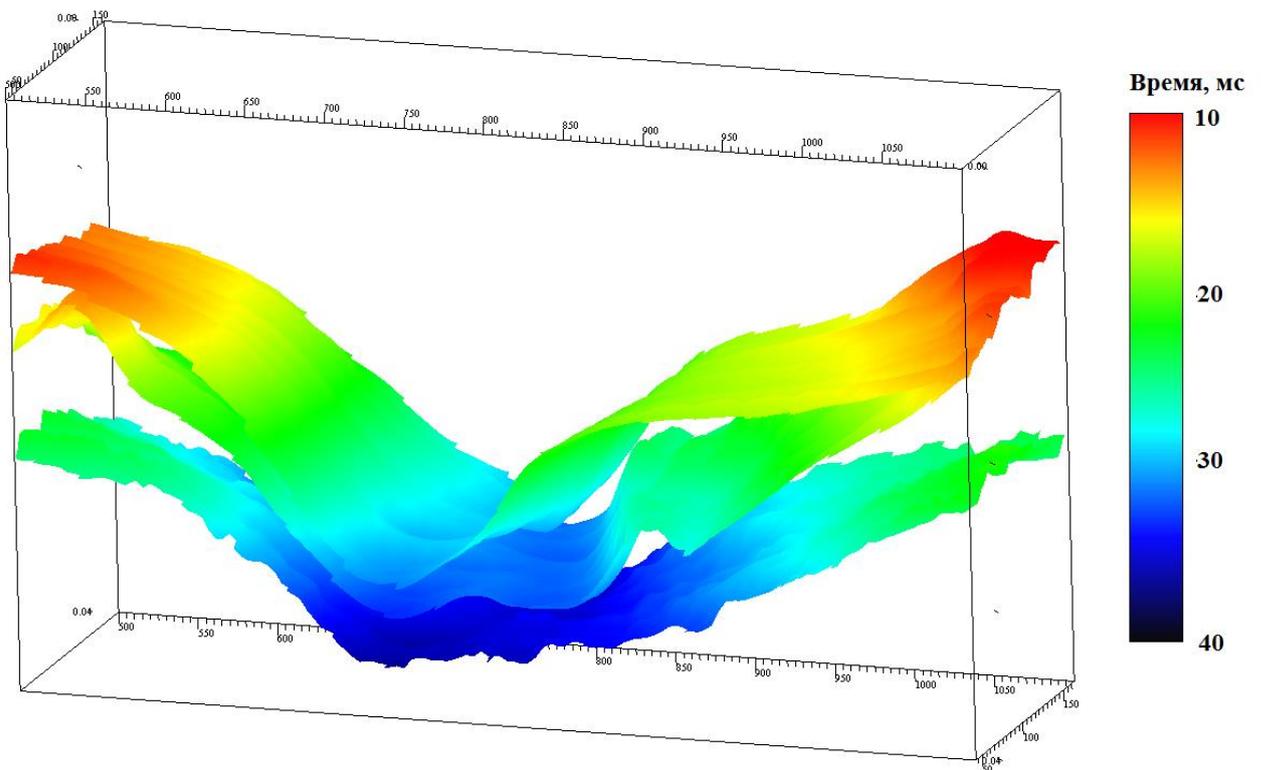


Рис. 4.36: Трехмерная модель сейсмостратиграфических комплексов

4.4. Выводы к главе 4

1. В главе рассмотрены особенности обработки данных трехмерных высокоразрешающих сейсмических и сейсмоакустических наблюдений на акваториях, а также отмечены основные моменты, которые необходимо учитывать при разработке графа обработки;
2. На примере съемки, проведенной во фьорде Люнген (Норвежское море) с использованием системы P-Cable 3D, показан граф обработки высокоразрешающих трехмерных сейсмических данных. Особое внимание было уделено регуляризации амплитуд и их восстановлению после проведения трехмерной миграции. Полученный с его помощью сейсмический куб был успешно использован для картирования и идентификации опасных инженерно-геологических явлений и процессов;
3. Результаты трехмерных сейсмоакустических наблюдений, проведенных в губе Ругозерская (Белое море) с использованием новой методики, разработанной автором, были обработаны по специализированному графу, который позволил учесть вертикальные и горизонтальные перемещения приемоизлучающего массива вследствие течений и неравномерности буксировки, а также ряд других факторов, снижающих качество исходных данных. В результате было получено трехмерное сейсмическое изображение верхней части донных отложений с пространственным разрешением в первые метры (при размере бина 0.5×0.5 метра). Последующий анализ сейсмического куба позволил получить качественно новые данные о строении и характере распространения четвертичных отложений в губе Ругозерская.

Заключение

Основные результаты диссертационного исследования могут быть сформулированы следующим образом.

На основе анализа опасных инженерно-геологических явлений и процессов, представляющих угрозу при строительстве и эксплуатации гидротехнических сооружений на мелководных акваториях, и современной практики проведения изысканий сделан вывод, что для определения пространственного положения опасных объектов необходимо применять трехмерные сейсмоакустические методы в совокупности с другими видами инженерно-геологических исследований. Сформулированы требования к разрешающей способности применяемых методик и предложена последовательность выбора и анализа основных параметров съемки.

Рассмотрены преимущества и недостатки всех известных автору методик трехмерных сейсмоакустических наблюдений на акваториях, на основе чего делается вывод, что большинство приемоизлучающих систем не позволяют идентифицировать мелкомасштабные опасные инженерно-геологические процессы и явления. Невысокие показатели производительности также ограничивают применимость описанных систем в составе инженерно-геологических изысканий.

Автором предъявлены требования к новой методике трехмерных сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях и предложен способ буксировки многоканальных сейсмических кос, удовлетворяющий им. Для анализа характеристик разработанной методики автором была разработана программа для системы математических вычислений Octave/MATLAB. На основе теоретического анализа различных конфигураций приемоизлучающего массива, технических и экономических показателей, а также рассмотрения преимуществ и ограничений разработанной методики, делается вывод о возможности детальных трехмерных сейсмоакустических данных о строении верхней части донных отложений на мелководных участках акватории при оптимальных временных и финансовых затратах.

Разработанный автором специализированный граф обработки трехмерных высокоразрешающих сейсмических и сейсмоакустических данных был успешно апробирован на данных съемок в Норвежском море и в акватории Белого моря. Полученные результаты позволили выделить мелкомасштабные геологические особенности и определить характер их пространственного распространения.

Полученные в рамках диссертации результаты расширяют возможности сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях при проведении инженерно-геологических изысканий и других видов исследований, требующих детального изучения строения верхней части донных отложений. В работе рассмотрены методические и практические

аспекты проведения полевых наблюдений, а также предложен граф обработки получаемых данных.

Для дальнейшего развития методики трехмерных сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях необходима разработка и создание специализированной сейсмоакустической аппаратуры для возбуждения и регистрации упругих колебаний в соответствии с требованиями, сформулированными в диссертационной работе. Необходимо повышение точности определения положения элементов приемоизлучающего массива как с использованием технических средств, так и при последующем анализе данных. Также необходимо дальнейшее совершенствование алгоритмов, программных средств и графов цифровой обработки для получения детального объемного изображения донных отложений.

Список литературы

1. Ампилов, Ю.П. Применение мультиазимутальных и широкоазимутальных систем наблюдений в морской 3D сейсморазведке / Ю.П. Ампилов, А.А. Дементьев // Тезисы конференции «Сейсмо-2013». – Коктебель, 2013. – с. 1-3.
2. Басс, Ф.Г. Рассеяние волн на статически неровной поверхности / Ф.Г. Басс, И.М. Фукс. – М.: Наука, 1972. – 424 с.
3. Воскресенский, Ю.Н. Построение сейсмических изображений: учебное пособие для ВУЗов / Ю.Н. Воскресенский. – М.: РГУ нефти и газа, 2006. – 117 с.
4. Гайнанов, В.Г. Разработка компьютеризированной технологии одноканальных и многоканальных сейсмоакустических исследований на акваториях: дис. ... д-ра тех. наук: 25.00.10 / Гайнанов Валерий Гарифьянович. – М., 2009. – 195 с.
5. Девдариани, Н.А. Геологическое строение Беломорской впадины: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук: 04.00.01 / Девдариани Наталья Анатольевна. – М., 1985. – 212 с.
6. Ионов, В.Ю. Опыт исследования подводных оползней для обоснования строительства морских нефтегазовых сооружений // Инженерные изыскания. – 2012. – № 6. – С. 52-63.
7. Калинин, А.В. Сейсмоакустические исследования на акваториях / А.А. Калинин, В.В. Калинин, Б.Л. Пивоваров. – М.: Недра, 1983. – 204 с.
8. Калинин, В.В. Линейная одномерная корректирующая фильтрация для повышения разрешающей способности сейсмических данных / В.В. Калинин, Л.М. Кульницкий, М.Ю. Токарев // Вестник Московского Университета, Серия 4, Геология. – 1992. – № 3. – С. 67-73.
9. Козлов, С.А. Опасные для нефтегазопромысловых сооружений геологические и природно-техногенные процессы на Западно-Арктическом шельфе России // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2005. – С. 1-24.
10. Ласточкин, А.Н. Морфология и генезис подводных долин северного шельфа Евразии / А.Н. Ласточкин // Возраст и генезис переуглублений на шельфах и история речных долин. – М.: Наука, 1984. – С. 22-28.
11. Меркин, Д.Р. Введение в механику гибкой нити / Д.Р. Меркин. – М.: Наука, 1980. – 240 с.
12. Невесский, Е.Н. Белое море. Седиментогенез и история развития в голоцене / Е.Н. Невесский, В.С. Медведев, В.В. Калининко. – М. Наука, 1977. – 236 с.
13. Опыт сейсмоакустического профилирования с многократным перекрытием: возможности и ограничения / В.Г. Гайнанов, Н.А. Кузуб, М.Ю. Токарев [и др.] // Разведка и охрана недр. – 2006. – № 12. – С. 21-25.
14. Певзнер, Р.Л. Интенсивность неаддитивных помех при сейсмических исследованиях на акваториях / Р.Л. Певзнер, А.В. Калинин // Разведка и охрана недр. – 2002. – № 1. – С. 31-34.

15. Пейтон, Ч. Сейсмическая стратиграфия. Использование при поисках и разведке нефти и газа. Часть 1 / Ч. Пейтон. – М.: Мир, 1982. – 375 с.
16. Пример выделения опасных геологических объектов по данным морских высокоразрешающих трехмерных сейсмических наблюдений в Норвежском море / А.А. Шматкова, А.А. Шматков, В.Г. Гайнанов [и др.] // Вестник Московского Университета, Серия 4, Геология. – 2015. – № 1. – С. 55-62.
17. Рекант, П.В. Распространение субаквальных многолетнемерзлых пород на шельфе Карского моря / П.В. Рекант, А.А. Васильев // Криосфера Земли. – 2011. – Т. XV, №4. – С. 69-72.
18. Рокос, С.И. Свободный газ и многолетняя мерзлота в осадках верхней части разреза мелководных районов шельфа Печорского и Карского морей / С.И. Рокос, Д.А. Костин, А.Г. Длугач // Седиментологические процессы и эволюция морских экосистем в условиях морского перигляциала. – Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2001. – С. 40-51.
19. СП 11-114-2004. Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений. – М.: ФГУП «ПНИИИС» Госстроя России. – 105 с.
20. СП 47.13330.2012. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96. – М. – 110 с.
21. Спиридонов, М.А. Геология Белого моря / М.А. Спиридонов, Н.А. Девдариани, А.В. Калинин // Советская геология. – 1980. – № 4. – С. 45-55.
22. СТО Газпром 2-3.7-050-2006 Морской стандарт DNV-OS-F101 Подводные трубопроводные системы. – М.: Издательский Дом Полиграфия, 2006. – 453 с.
23. Технология обработки и интерпретации высокоразрешающих трехмерных морских сейсмических данных для решения инженерно-геологических задач // А.А. Шматков, В.Г. Гайнанов, А.А. Шматкова [и др.] // Технологии сейсморазведки. – 2014. – № 4. – С. 93-103.
24. Урупов, А.К. Основы трехмерной сейсморазведки / А.К. Урупов. – М.: Нефть и Газ, 2004. – 584 с.
25. Фиников, Д.Б. Восстановление амплитуд после миграции / Д.Б. Фиников, А.В. Шалашников // Руководство пользователя Prime 3D. – 2012.
26. Хаттон, Л. Обработка сейсмических данных. Теория и практика / Л. Хаттон, М. Уэрдингтон, Дж. Мейкии. – М.: Мир, 1989. – 216 с.
27. Череповский, А.В. Пути снижения отпечатка системы наблюдений // Технологии сейсморазведки. – 2009. – № 2. – С. 39-48.
28. Шалаева, Н.В. Основы сейсмоакустики на мелководных акваториях / Н.В. Шалаева, А.В. Старовойтов. – М.: МГУ, 2010. – 254 с.

29. Шерифф, Р. Сейсморазведка. В двух томах. Том 1. История, теория и получение данных / Р. Шерифф, Л. Гелдарт. – М.: Мир, 1987. – 448 с.
30. Шматков, А.А. Новая методика трехмерных сейсмоакустических наблюдений на мелководных акваториях / А.А. Шматков, М.Ю. Токарев // Экспозиция Нефть Газ. – 2014. – № 6. – С. 39-42.
31. Шматков, А.А. Обзор технологий трехмерных сейсмоакустических наблюдений на акваториях / А.А. Шматков, В.Г. Гайнанов, М.Ю. Токарев // Технологии сейсморазведки. – 2015. – № 2. – С. 86-97.
32. 3D high-resolution acoustic imaging of the sub-seabed / M. Gutowski, J.M. Bull, J.K. Dix [et al.] // Applied Acoustics. – 2008. – Vol. 69. – pp. 412–421.
33. 3D seismic imaging of buried younger Dryas mass movement flows: Lake Windermere, UK / M.E. Vardy, L.J.W. Pinson, J.M. Bull [et al.] // Geomorphology. – 2010. – Vol. 118. – pp. 176–187.
34. 3D Seismic Survey Design / C.P. Ashton, B. Bacon, A. Mann [et al.] // Oilfield Review. – 1994. – Vol. 6, N 2. – pp. 19-32.
35. 3-D Seismic Surveys / T. Hansen, J. Kingston, S. Kjellesvik [et al.] // Oilfield Review. – 1989. – Vol. 1, N 3. – pp. 54-61.
36. An ultrahigh resolution 3-D survey of the shallow subsurface on the continental shelf of New Jersey / J. Pulliam, J.A. Austin Jr., E.C. Luhurbudi [et al.] // The Leading Edge. – 1996. – Vol. 15, N 7. – pp. 839-845.
37. Analysis of Holocene sedimentary features on the Adriatic shelf from 3D very high resolution seismic data (Triad survey) / T. Marsset, B. Marsset, Y. Thomas [et al.] // Marine Geology. – 2004. – Vol. 213. – pp. 73-89.
38. Antileakage Fourier transform for seismic data regularization / S. Xu, Y. Zhang, D. Pham [et al.] // Geophysics. – 2005. – Vol. 70, N 4. – pp. 113-120.
39. Biondi, B.L. 3-D Seismic Imaging / B.L. Biondi. – SEG, 2006. – 224 p.
40. Biondi, E. / Non-Stretch Fourth Order NMO through Iterative Partial Corrections and Deconvolution / E. Biondi, E. Strucchi, A. Mazzotti // Proc. of 75th EAGE Conference. – London, 2013. – 5 p.
41. Bocharova, A.A. Deghosting of Seismic Data Based on Adaptive Subtraction Algorithm / A.A. Bocharova, M.A. Poluboyarinov // 6th Congress of Balkan Geophysical Society. – Budapest, 2011. – 5 p.
42. British Standard 5930. Code of practice for site investigations. – London, 1999. – 207 p.
43. Broadband and beyond with marine towed streamers / M. Vassallo, K. Eggenberger, D. Manen [et al.] // The Leading Edge. – 2002. – Vol. 21, N 11. – pp. 1356-1365.

44. Brühl, M. Fresnel zones for broadband data / M. Brühl, G.J.O. Vermeer, M. Kiehn // *Geophysics*. – 1996. – Vol. 61, N 2. – pp. 600-604.
45. Bulat, J. Use of 3D Seismic data as a substitute for high-resolution seismic surveys for site investigation: HSE Research Report 459 / J. Bulat, D. Long. – Norwich: HSE, 2006. – 34 p.
46. Calarco, M. Offshore Geohazards: Industry Implications and Geoscientist Role / M. Calarco, F. Zolezzi, W.J. Johnson // *Proc. of First Applied Shallow Marine Geophysics Conference*. – Athens, 2014. – 5 p.
47. Canning, A. Another look at the question of azimuth / A. Canning, G.H. Gardner // *The Leading Edge*. – 1996. – Vol. 15, N 7. – pp. 821-823.
48. Chiocci, F.L. Seafloor mapping for geohazard assessment: state of the art / F.L. Chiocci, A. Cattaneo, R. Urgeles // *Marine Geophysical Research*. – 2011. – Vol. 32. – pp. 1-11.
49. Contribution of high-resolution 3D seismic near-seafloor imaging to reservoir-scale studies: application to the active North Anatolian Fault, Sea of Marmara / Y. Thomas, B. Marsset, G.K. Westbrook [et al.] // *Near Surface Geophysics*. – 2012. – Vol. 10. – pp. 291-301.
50. Conventional versus dual-sensor streamer data de-ghosting: a case study from a Haltenbanken survey / H. Tabti, A. Day, T. Schade [et al.] // *First Break*. – 2009. – Vol. 27, N 8. – pp. 101-108.
51. Cordsen, A. Planning Land 3-D Seismic Surveys / A. Cordsen, M. Galbraith, J. Peirce. – SEG, 2000. – 204 p.
52. Dahl, R. Ka dokker mein for stein! Geologi, Landskap og ressurser i Troms / R. Dahl, H. Sveian. – Trondheim: Norges geologiske undersøkelse, 2004. – 154 p.
53. Decimeter-resolution 3D seismic volume in shallow water: A case study in small-object detection / M.E. Vardy, J.K. Dix, T.J. Henstock [et al.] // *Geophysics*. – 2008. – Vol. 73, N 2. – pp. 33-40.
54. Design of a 3D Chirp sub-bottom imaging system / J.M. Bull, M. Gutowski, J.K. Dix [et al.] // *Marine Geophysical Researches*. – 2005. – Vol. 26. – pp. 157-169.
55. Dier, A. Guidelines for jack-up rigs with particular reference to foundation integrity: HSE Research Report 289 / A. Dier, B. Carroll, S. Abolfathi. – Norwich: HSE, 2004. – 91 p.
56. Dinn, G. Field experience with a new sub-bottom investigation tool: Acoustic 3-D imaging of the sub-seabed // *Proc. of Oceans Conference*. – Hampton Roads, 2012. – 9 p.
57. Dyer, J. Geohazard identification: the gap between the possible and reality in geophysical surveys for the engineering industry // *Marine Geophysical Researches*. – 2011. – Vol. 32. – pp. 37-47.
58. Ebuna, D.R. High-resolution offshore 3D seismic geophysical studies of infrastructure geohazards / D.R. Ebuna, T.J. Mitchell, P.J. Hogan [et al.] // *Proc. of SAGEEP Conference and Exhibition 2013*. – Denver, 2013. – 10 p.

59. Elboth, T. Flow and swell noise in marine seismic data / T. Elboth, B.A.P. Reif, O. Andreassen // *Geophysics*. – 2009. – Vol. 74, N 2. – pp. Q17-Q25.
60. Elboth, T. Time-frequency seismic data de-noising / T. Elboth, I.V. Presterud, D. Hermansen // *Geophysical Prospecting*. – 2010. – Vol. 58. – pp. 441-453.
61. Evaluation of a chemical munition dumpsite in the Baltic Sea based on geophysical and chemical investigations / T. Missiaen, M. Söderström, I. Popescu [et al.] // *The Science of the Total Environment*. – 2010. – Vol. 408. – pp. 3536-3553.
62. Farouki, M. Utilizing 3D exploration seismic data for seabed mapping and near surface geohazard investigation / M. Farouki, S. Sakamoto // *Proc. of the 11th SEGJ International Symposium*. – Yokohama, 2013. – 4 p.
63. Games, K.P. Shallow gas detection – why HRS, why 3D, why not HRS 3D? // *First Break*. – 2012. – Vol. 30, N 10. – pp. 67-75.
64. Games, K.P. The Successful Design, Development and Acquisition of a UHRS 3D Seismic Dataset / K.P. Games, N.D. Wakefield // *Proc. of First Applied Shallow Marine Geophysics Conference*. – Athens, 2014. – 5 p.
65. Geohazards from seafloor instability and mass flow: OGP Report No. 425. – London: OGP, 2009. – 40 p.
66. Geophysical, Geological, Environmental and Geotechnical Program Guidelines / Canada-Newfoundland and Labrador Offshore Petroleum Board (C-NLOPB). – 2012. – 58 p.
67. Guidance notes for the planning and execution of geophysical and geotechnical ground investigations for offshore renewable energy developments. – OSIG, 2014. – 49 p.
68. Guidance notes on geotechnical investigations for marine pipelines. – OSIG, 2004. – 47 p.
69. Guidance notes on geotechnical investigations for subsea structures. – OSIG, 2000. – 46 p.
70. Guidelines for the conduct of offshore drilling hazard site surveys: OGP Report No. 373-18-1. – London: OGP, 2011. – 38 p.
71. Gutowski, M. Fast static corrections methods for high-frequency multichannel marine reflection data: A high resolution seismic study of channel-levee systems on the Bengal Fan / M. Gutowski, M. Breitzke, V. Spieb // *Marine Geophysical Researches*. – 2002. – Vol. 23. – pp. 57-75.
72. Henriët, J.-P. Very high resolution 3D seismic reflection imaging of small-scale structural deformation / J.-P. Henriët, M. Verschuren, W. Versteeg // *First Break*. – 1992. – Vol. 10, N 3. – pp. 81-88.
73. Howard, M. Marine seismic surveys with enhanced azimuth coverage: Lessons in survey design and acquisition // *The Leading Edge*. – 2007. – Vol. 26, N 4. – pp. 480-493.

74. Insights into Active Deformation in the Gulf of Cadiz from New 3-D Seismic and High-Resolution Bathymetry Data / G.J. Crutchley, C. Berndt, D. Klaeschen [et al.] // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2011. – Vol. 12, N 1. – pp. 1–20.
75. Judd, A. Seabed Fluid Flow. The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment / A. Judd, M. Hovland. – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – 493 p.
76. Kallweit, R.S. The limits of zero-phase wavelets / R.S. Kallweit, L.C. Wood // *Geophysics*. – 1982. – Vol. 47, N 7. – pp. 1035-1046.
77. Knapp, R.W. Fresnel zones in the light of broadband data // *Geophysics*. – 1991. – Vol. 56, N 3. – pp. 354-359.
78. Knapp, R.W. High-resolution common-depth-point reflection profiling: Field acquisition parameter design / R.W. Knapp, D.W. Steeples // *Geophysics*. – 1986. – Vol. 51, N 2. – pp. 283-294.
79. Kvalstad, T.J. What is the current “Best Practice” in offshore Geohazard investigations? A State-of-the-Art Review // *Proc. of Offshore Technology Conference*. – Houston, 2007. – 14 p.
80. La Bella, G. The cross-shooting methodology: Design, acquisition, and processing / G. La Bella, E. Loinger, L. Savin // *The Leading Edge*. – 1998. – Vol. 17, N 11. – pp. 1549-1553.
81. Levin, F.K. The effect of binning on data from a feathered streamer // *Geophysics*. – 1984. – Vol. 49, N 8. – pp. 1386-1387.
82. Lindsey, J.P. The Fresnel zone and its interpretive significance // *The Leading Edge*. – 1989. – Vol. 8, N 10. – pp. 33-39.
83. Liner, C.L. 3-D seismic survey design for linear $v(z)$ media / C.L. Liner, W.D. Underwood // *Geophysics*. – 1999. – Vol. 64, N 2. – pp. 486-493.
84. Lippus, C. High-resolution revolution // *Oilfield Technology*. – 2014. – Vol. 7, N 6. – pp. 56-62.
85. Long, A. An overview of seismic azimuth for towed streamers // *The Leading Edge*. – 2010. – Vol. 29, N 5. – pp. 512-523.
86. Long, A. Marine acquisition: Moving beyond the signal-to-noise ratio? // *First Break*. – 2003. – Vol. 21, N 12. – pp. 37-40.
87. Lowag, J. Three-Dimensional Investigation of Buried Structures with Multi-Transducer Parametric Sub-Bottom Profiler as part of Hydrographical Applications / J. Lowag, J. Wunderlich, P. Hümbs // *Proc. of HYDRO 2010 Conference*. – Rostock-Warnemünde, 2010. – 8 p.
88. Lundqvist, D. Recent problems related to the identification of shallow gas traps // *Proc. of Oceanology International Exhibition*. – London, 2012. – 3 p.
89. Margrave, G.F. Zero offset seismic resolution theory for linear $v(z)$ // *CREWES Research Report*. – 1999. – Vol. 9. – pp. 1-18.
90. Mini 3D for shallow gas reconnaissance / des Vallieres, D. Enns, H, Kuhn [et al.] // *Proc. of Ocean Technology Conference*. – Houston, 1999. – 11 p.

91. Missiaen, T. A new 3D seismic acquisition system for very high and ultra high resolution shallow water studies / T. Missiaen, W. Versteeg, J.-P. Henriët // *First Break*. – 2002. – Vol. 20, N 4. – pp. 227–232.
92. Missiaen, T. Shallow marine acoustic imaging in environmental investigations: PhD Thesis / T. Missiaen. – Ghent: Ghent University. – 164 p.
93. Missiaen, T. VHR marine 3D seismics for shallow water investigations: Some practical guidelines // *Marine Geophysical Researches*. – 2005. – Vol. 26. – pp. 145–155.
94. Monk, D. Pitfalls in seismic acquisition // *The Leading Edge*. – 1999. – Vol. 18, N 9. – pp. 1080–1083.
95. Morrow, R. UXO Characterization by 3D Seismic Constrained Magnetometry Inversion / R. Morrow, M.E. Vardy, R. Hamilton [et al.] // *Proc. of Near Surface 2014 Conference*. – Athens, 2014. – 5 p.
96. Mosher, D.C. Status and trends of marine high-resolution seismic reflection profiling: Data acquisition / D.C. Mosher, P.G. Simpkin // *Geoscience Canada*. – 1999. – Vol. 26, N 4. – pp. 174–188.
97. Müller, C. High-Resolution 3D Marine Seismic Investigation of Hedeby Harbour, Germany / C. Müller, S. Woelz, S. Kalmring // *International Journal of Nautical Archaeology*. – 2013. – Vol. 42, N 2. – pp. 326–336.
98. Müller, C. The marine VHR 2.5-D seismic brute stack cube as a feasible tool for low budget investigation and research // *Marine Geophysical Researches*. – 2005. – Vol. 26. – pp. 197–206.
99. Okaya, D.A. Spectral properties of the earth's contribution to seismic resolution // *Geophysics*. – 1995. – Vol. 60, N 1. – pp. 241–251.
100. Optimizing the processing flow for variable-depth streamer data / D. Lin, R. Sablon, Y. Gao [et al.] // *First Break*. – 2011. – Vol. 29, N 9. – pp. 89–95.
101. Parkes, G. An acquisition system that extracts the earth response from seismic data / G. Parkes, S. Hegnal // *First Break*. – 2011. – Vol. 29, N 12. – pp. 81–87.
102. P-Cable High-Resolution 3D Seismic Imaging of Hydrate Occurrences Over Unusually Large Gas Chimneys in the SW Barents Sea / S. Buenz, S. Vadakkepuliambatta, J. Mienert [et al.] // *NETL Fire in the Ice newsletter*. – 2012. – Vol. 12, N 2. – pp. 10–13.
103. P-Cable High-Resolution Seismic / S. Planke, F. Eriksen, C. Berndt [et al.] // *Oceanography*. – 2009. – Vol. 22, N 1. – p. 85.
104. Planke, S. P-Cable High Resolution Seismic Imaging of Shallow Gas in the Barents Sea / S. Planke, O.K. Eriksen, J. Mienert [et al.] // *Proc. of 72st EAGE Conference & Exhibition*. – Barcelona, 2010. – 5 p.
105. Plassen, L. Fluid flow features in fjord-fill deposits, Ullsfjorden, North Norway / L. Plassen, T.O. Vorren // *Norwegian Journal of Geology*. – 2003. – Vol. 83. – pp. 37–42.

106. Plaza-Faverola, A. Repeated fluid expulsion through sub-seabed chimneys offshore Norway in response to glacial cycles / A. Plaza-Faverola, S. Buenz, J. Mienert // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2011. – Vol. 305. – pp. 297-308.
107. Proffitt, J.M. A history of innovation in marine seismic data acquisition // *The Leading Edge*. – 1991. – Vol. 10, N 3. – pp. 24-30.
108. Rogers, A. The High Resolution 3-D Seismic Survey System “Kite”/ A. Rogers, T. Yamamoto, H. Shon [et al.] // *Proc. of SEG Annual Meeting*. – Washington, 1993. – pp. 531-535.
109. Rutgers, W.R. Multi-Tip Sparker for the Generation of Acoustic Pulses / W.R. Rutgers, I. Jong // *Sensor Review*. – 2003. – Vol. 23, N 1. – pp. 55–59.
110. Scheidhauer, M. Development of a system for 3D high-resolution seismic reflection profiling on lakes / M. Scheidhauer, F. Marillier, D. Dupuy // *Marine Geophysical Researches*. – 2005. – Vol. 26. – pp. 183–195.
111. Seismic Technology: Evolution of a Vital Tool for Reservoir Engineers / Journal of Petroleum Technology Staff // *Journal of Petroleum Technology*. – 1999. – N 2. – pp. 22-28.
112. Selvage, J. Maximizing the value of 3D seismic data for shallow geohazard identification / J. Selvage, C. Jones, J. Edgar // *First Break*. – 2012. – Vol. 30, N 8. – pp. 73-83.
113. Sheriff, R.E. Nomogram for Fresnel-zone calculations // *Geophysics*. – 1980. – Vol. 45, N 5. – pp. 968-972.
114. Shooting Seismic Surveys in Circles / M. Buia, P.E. Flores, D. Hill [et al.] // *Oilfield Review*. – 2008. – Vol. 20, N 3. – pp. 18-31.
115. Simpkin, P.G. The Boomer Sound Source as a Tool for Shallow Water Geophysical Exploration // *Marine Geophysical Researches*. – 2005. – Vol. 26. – pp. 171-181.
116. Sismique marine haute résolution 3D: un nouvel outil de reconnaissance à destination de la communauté scientifique / Y. Thomas, B. Marsset, S. Didailier [et al.] // *Comptes Rendus Geoscience*. – 2004. – Vol. 336. – pp. 579–585.
117. Sismique très haute résolution 3D: une nouvelle méthode d’imagerie des sols superficiels / T. Marsset, B. Marsset, Y. Thomas [et al.] // *Comptes Rendus Geoscience*. – 2002. – Vol. 334. – pp. 403-408.
118. Slicing and dicing HR seismic acquisition: Varied approaches to delivery of high-resolution 3D seismic data volumes for drilling-hazard studies / A.W. Hill, A. Arogunmati, G.A. Wood [et al.] // *The Leading Edge*. – 2015. – Vol. 34, N 4. – pp. 380-388.
119. Special issue on applied marine geophysics foreword / J. Arthur, D. Long, M. Vanneste [et al.] // *Near Surface Geophysics*. – 2011. – Vol. 10, N 4. – pp. 263–265.
120. Strategies for waveform processing in sparker data / M.J. Duchesne, G. Bellefleur, M. Galbraith [et al.] // *Marine Geophysical Researches*. – 2007. – Vol. 28, N 2. – pp. 153-164.

121. Temporal and Spatial Sampling Constraints in High-Resolution 3-D Seismic Surveys / K.C. Abdulah, J.B. Anderson, S. Coperude [et al.] // *Marine Geophysical Researches*. – 1997. – Vol. 19. – pp. 97-113.
122. The geological Hubble: A reappraisal for shallow water / M.E. Vardy, J.M. Bull, J.K. Dix [et al.] // *The Leading Edge*. – 2011. – Vol. 30, N 2. – pp. 154-159.
123. The use of a high-resolution 3D Chirp sub-bottom profiler for the reconstruction of the shallow water archaeological site of the Grace Dieu (1439), River Hamble, UK / R.M.K. Plets, J.K. Dix, J.R. Adams [et al.] // *Journal of Archaeological Science*. – 2009. – Vol. 36. – pp. 408–418.
124. Towards high-resolution 3D marine seismic surveying using Boomer sources / C. Müller, B. Milkereit, T. Bohlen [et al.] // *Geophysical Prospecting*. – 2002. – Vol. 50, N 5. – pp. 517-526.
125. Trorey, A.W. A simple theory for seismic diffractions // *Geophysics*. – 1970. – Vol. 35, N 5. – pp. 762-784.
126. Ultra-high-resolution marine 2D–3D seismic investigation of the Liman Tepe/Karantina Island archaeological site (Urla/Turkey) / C. Müller, S. Woelz, Y. Ersoy [et al.] // *Journal of Applied Geophysics*. – 2009. – Vol. 68. – pp. 124-134.
127. Vakulenko, S.A. Deghosting of High Resolution Marine Seismic Data by Adaptive Filtering Algorithm / S.A. Vakulenko, S.V. Buryak, P.A. Gofman, D.B. Finikov // *Proc. of First Applied Shallow Marine Geophysics Conference*. – Athens, 2014. – pp. 1-5.
128. Verbeek, N.H. Characteristics of high-resolution marine reflection profiling sources / N.H. Verbeek, T.M. McGee // *Journal of Applied Geophysics*. – 1995. – Vol. 33. – pp. 251-269.
129. Vermeer, G.J.O. 3D Seismic Survey Design. Second Edition / G.J.O. Vermeer. – SEG, 2012. – 369 p.
130. Vermeer, G.J.O. Factors affecting spatial resolution // *Geophysics*. – 1999. – Vol. 64, N 3. – pp. 942-953.
131. Vermeer, G.J.O. NMO stretch in survey design and processing / G.J.O. Vermeer // *Proc. of SEG Annual Meeting*. – Houston, 2013. – pp. 171-175.
132. Versteeg, W. High-Resolution 3D and Pseudo-3D Seismic Investigations in Shallow Water Environments / W. Versteeg, M. Verschuren, J.-P. Henriët [et al.] // *Proc. of European Conference on Underwater Acoustics*. – Luxembourg, 1992. – pp. 497–500.
133. Vestrum, R. Technologies from foothills seismic imaging: replacements or complements? / R. Vestrum, J. Gittins // *First Break*. – 2009. – Vol. 27, N 2. – pp. 1-6.
134. Wardell, N. 3D pre-processing techniques for marine VHR seismic data / N. Wardell, P. Diviacco, R. Sinceri // *First Break*. – 2002. – Vol. 20, N 7. – pp. 457-466.
135. Widess, M.B. How thin is a bed? // *Geophysics*. – 1973. – Vol. 38, N 6. – pp. 1176-1180.

136. Wood, G.A. Current Geohazard Problems and Their Geophysical Interpretation – An International Overview / G.A. Wood, I.W. Hamilton // Proc. of Offshore Technology Conference. – Houston, 2002. – 9 p.
137. Yilmaz, O. Seismic data analysis – processing, inversion, and interpretation of seismic data / O. Yilmaz. – Tulsa: SEG, 2001. – 2025 p.

Список иллюстраций

Рис. 1.1: Схема расположения лицензионных участков ОАО «НК «Роснефть» на арктическом шельфе Российской Федерации. Черным цветом отмечена изобата 50 метров	10
Рис. 1.2: Опасные инженерно-геологические процессы и явления [по Chiocci et al., 2011].....	13
Рис. 1.3: Построение сейсмического изображения в двухмерном (А) и трехмерном (Б) случаях [по Biondi, 2006]	21
Рис. 1.4: Особенности получения сейсмического изображения геологической среды (А) при проведении профильных (Б), трехмерных сейсмических (В) и сейсмоакустических (Г) наблюдений [по Vestrum, Gittins, 2009]	22
Рис. 1.5: Схема стандартного взаимного расположения элементов трехмерной приемоизлучающей системы	23
Рис. 1.6: Блок-схема последовательности выбора параметров трехмерных сейсмоакустических съемок на мелководных акваториях.....	24
Рис. 1.7: Критерии вертикальной разрешающей способности [по Kallweit, Wood, 1982].....	25
Рис. 1.8: Определение первой зоны Френеля для сферической волны (а) [по Yilmaz, 2001] и влияние частотного состава на ее размер [по Пейтон, 1982].....	28
Рис. 1.9: Зона Френеля до и после двухмерной и трехмерной миграции [по Lindsey, 1989]	29
Рис. 1.10: Размер бина для наклонной границы [по Cordsen et al., 2000].....	31
Рис. 1.11: Зависимость максимального угла наклона отражающей границы, неподверженной алиасингу, от размера бина и частоты	31
Рис. 1.12: Взаимное влияние пространственной дискретизации и отношения сигнал/шум на качество сейсмического изображения	32
Рис. 1.13: Схема формирования зон различной кратности [по Cordsen et al., 2000].....	34
Рис. 1.14: Пример проявления отпечатка системы наблюдений на карте кратности.....	34
Рис. 1.15: Классификация трехмерных сейсмических съемок по азимутальности [по Buia et al., 2008].....	37
Рис. 1.16: Зависимость максимального удаления без интерференции прямой и отраженной волн от глубины воды и длительности сейсмического импульса	38
Рис. 2.1: Схематическое изображение эволюции трехмерных систем, применяемых в разведочной сейсморазведке [по Vermeer, 2012]	41
Рис. 2.2: Спуск приемоизлучающей системы в воду (а), положение системы во время проведения съемки (б), схема устройства (в) и пример полученных данных (г) [по Gutowski et al., 2008]....	45
Рис. 2.3: Внешний вид системы Sub-Bottom Imager для установки на телеуправляемый подводный аппарат рабочего класса [по Dinn, 2012]	47

Рис. 2.4: Пример данных, полученных при инспекции подводного трубопровода (а) и при изучении археологического объекта (б) [по Dinn, 2012].....	47
Рис. 2.5: Внешний вид приемоизлучающей системы Innomar (а), схема профилей съемки (б) и временной срез полученного сейсмического куба (в) [по Lowag et al., 2010]	48
Рис. 2.6: Внешний вид (слева) и схема (справа) системы SEAMAP-3D [по Müller et al., 2009] ..	49
Рис. 2.7: Временные срезы сейсмического куба, полученного системой SEAMAP-3D при съемке археологических объектов в Турции [по Müller et al., 2013]	50
Рис. 2.8: Схема системы "Kite" [по Rogers et al., 1993]	51
Рис. 2.9: Схема системы SEISCAT [по Henriot et al., 1992].....	51
Рис. 2.10: Внешний вид системы Opus3D [Missiaen, 2005].....	52
Рис. 2.11: Схема системы Opus3D (а) и пример полученных данных (б) [по Missiaen, 2005]	53
Рис. 2.12: Схема системы института IFREMER [по Marsset et al., 2002; Thomas et al., 2004].....	54
Рис. 2.13: Пример сейсмических кубов, полученных институтом IFREMER возле о. Корсика (а) и в Норвежском море (б) [по Thomas et al., 2004].....	55
Рис. 2.14: (А) Схематический разрез судна с выстрелами для буксировки кос; (Б) оголовье косы закреплено на плоту, поддерживающем выстрелы; (В) положение выстрелов регулируется веревками [Scheidhauer et al., 2005]	56
Рис. 2.15: Схема системы с тремя косами для проведения высокоразрешающих трехмерных наблюдений на озерах [по Scheidhauer et al., 2005]	56
Рис. 2.16: Пример данных, полученных с использованием системы университета Лозанны [по Scheidhauer et al., 2005]	57
Рис. 2.17: Схема системы P-Cable: вид сверху (А) и сзади (Б)	59
Рис. 2.18: Внешний вид системы P-Cable 3D во время проведения работ	60
Рис. 2.19: Обзорная схема района работ и фактическая сеть профилей съемок 2012 года	61
Рис. 2.20: Схема приемоизлучающего массива при проведении съемки 2012 года.....	62
Рис. 2.21: Сравнение амплитудных спектров донного отражения на различных каналах приемной системы	63
Рис. 3.1: Схема буксировки приемоизлучающего массива при помощи выстрелов	66
Рис. 3.2: Схема буксировки приемоизлучающего массива при помощи параванов	66
Рис. 3.3: Угол подхода отраженной волны в зависимости от глубины воды и удаления.....	68
Рис. 3.4: Диаграммы направленности сейсмических каналов, состоящих из 2, 3, 4 гидрофонов и шагом между ними 0.25, 0.5, 0.75, 1 метр для различных частот	69
Рис. 3.5: Сравнение частотных характеристик источников упругих колебаний	71
Рис. 3.6: Схематическое изображение возможного движения элементов приемоизлучающего массива [по Wardell et al., 2002].....	75

Рис. 3.7: Схема возможного расположения ГНСС-приемников в случае буксировки приемоизлучающего массива с использованием выстрелов (а) и параванов (б).....	77
Рис. 3.8: Параллельная (а) [по Vermeer, 2012] и антипараллельная (б) сеть трехмерных наблюдений.....	78
Рис. 3.9: Пояснительный рисунок к расчету координат приемников.....	79
Рис. 3.10: Результаты анализа характеристик приемоизлучающего массива с одним источником упругих колебаний.....	82
Рис. 3.11: Результаты анализа характеристик приемоизлучающего массива с измененным положением источника упругих колебаний.....	83
Рис. 3.12: Распределение кратности (расстояние между точками буксировки 20 метров).....	83
Рис. 3.13: Распределение кратности (расстояние между точками буксировки 12 метров).....	83
Рис. 3.14: Распределение кратности (расстояние между точками буксировки 8 метров).....	84
Рис. 3.15: Распределение кратности (интервал возбуждения 0.4 м).....	84
Рис. 3.16: Распределение кратности (межпрофильное расстояние уменьшено на 25%).....	85
Рис. 3.17: Результаты анализа характеристик приемоизлучающего массива с двумя источниками упругих колебаний.....	86
Рис. 3.18: Схема расположения района работ в акватории Белого моря.....	91
Рис. 3.19: НИС «Студент» в акватории Белого моря.....	92
Рис. 3.20: Внешний вид многоканальной сейсмической косы Геонт-Шельф.....	92
Рис. 3.21: Система регистрации трехмерных сейсмоакустических данных на базе двух независимых сейсмических станций Геонт-Шельф.....	93
Рис. 3.22: Схема коммуникаций основных компонентов приемоизлучающей системы.....	93
Рис. 3.23: Схематическое изображение излучателя типа «спаркер» (а) и поперечный разрез магистральной линии (б).....	93
Рис. 3.24: Схема района работ (А), плановая (Б) и фактическая (В) сеть профилей.....	95
Рис. 3.25: Схема буксировки приемоизлучающего массива во время проведения полевого эксперимента в губе Ругозерская.....	95
Рис. 3.26: Приемоизлучающая система во время спускоподъемных операций (слева) и разворота судна (справа) (фото А.А. Вайнштейна).....	96
Рис. 3.27: Скорость движения судна на различных профилях съемки.....	96
Рис. 4.1: Местоположение района исследований в Норвежском море (А) и детальная схема района работ с картой профилей съемки (Б).....	101
Рис. 4.2: Изменение уровня моря во время проведения полевых наблюдений по данным уровневого поста в порту Тромсе.....	103

Рис. 4.3: Фрагмент сейсмического куба в поперечном направлении до ввода статических поправок (А), после учета приливно-отливных течений (Б) и после расчета корректирующих поправок (В).....	104
Рис. 4.4: Карта распределения кратности по площади исследований, гистограммы кратности и длины годографа	104
Рис. 4.5: Временной разрез до (слева) и после (справа) регуляризации сейсмического куба....	105
Рис. 4.6: Карта среднеквадратичных амплитуд отражения от дна до (вверху) и после (внизу) регуляризации сейсмического куба.....	105
Рис. 4.7: Горизонтальные спектры и значения среднеквадратичных скоростей для горизонта внутри слоистой толщи (слева) и по кровле акустического фундамента (справа).....	106
Рис. 4.8: Фрагмент временного разреза до (А), после 2Д (Б) и 3Д миграции (В).....	107
Рис. 4.9: Батиметрическая карта, построенная на основе данных системы P-Cable 3D	108
Рис. 4.10: Горизонтальные спектры и значения среднеквадратичных скоростей для горизонта	108
Рис. 4.11: Пример сейсмограммы ОПВ (цветом выделены каналы со слабым усилением).....	111
Рис. 4.12: Фрагмент сейсмограмм 18 и 19 каналов с высокоамплитудными помехами.....	111
Рис. 4.13: Фрагмент сейсмограммы с низкими амплитудами отдельных участков сейсмических трасс.....	112
Рис. 4.14: Сейсмограммы ОПВ без возбуждения упругих колебаний и графики среднеквадратичных амплитуд.....	112
Рис. 4.15: Сейсмограммы ОПВ без возбуждения упругих колебаний и графики среднеквадратичных амплитуд в полосе частот 0-200 Гц (А) и 200-3000 Гц (Б).....	113
Рис. 4.16: Сейсмограммы ОПВ профильной (А) съемки без возбуждения упругих колебаний и графики среднеквадратичных амплитуд.....	113
Рис. 4.17: Контроль качества расчета геометрии наблюдений.....	114
Рис. 4.18: Сравнение характерных форм рельефа отложений на сейсмограммах общих удалений профилей съемки D2 и С2 до (А) и после (Б) коррекции геометрии наблюдений.....	115
Рис. 4.19: Карта распределения кратности (размер бина 0.5 × 0.5 м).....	116
Рис. 4.20: Гистограмма кратности (в полнократной зоне).....	116
Рис. 4.21: Фрагмент продольного профиля до (А) и после (Б) фильтрации в частотно-временной области	117
Рис. 4.22: Форма сигнала волны, отраженной от поверхности дна, на различных линиях съемки	117
Рис. 4.23: Амплитудные спектры донного отражения на различных линиях съемки.....	118

Рис. 4.24: Фрагмент сейсмограммы до (А) и после (Б) применения адаптивной рекурсивной фильтрации	118
Рис. 4.25: Пикировка отражения от морского дна (А), сглаженная пикировка (Б), разница между ними (В) и сравнение предсказанных значений уровня воды (Г, фиолетовые круги) с рассчитанными (Г, синяя линия)	119
Рис. 4.26: Пример поперечных профилей сейсмического куба до (А) и после (Б) ввода статических поправок	120
Рис. 4.27: Временной срез сейсмического куба до (А) и после (Б) ввода статических поправок	120
Рис. 4.28: Батиметрическая карта, построенная по данным трехмерной сейсмоакустической съемки.....	121
Рис. 4.29: Объемное изображение сейсмического куба, полученного в результате обработки.	121
Рис. 4.30: Пример выделения отражающих горизонтов (продольный профиль 101)	122
Рис. 4.31: Карта изохрон кровли акустического фундамента.....	122
Рис. 4.32: Карта изохрон кровли моренных отложений.....	123
Рис. 4.33: Карта мощности моренных отложений	123
Рис. 4.34: Карта изохрон кровли современных морских осадков	123
Рис. 4.35: Карта мощности современных морских осадков.....	124
Рис. 4.36: Трехмерная модель сеймостратиграфических комплексов	124

**Приложение А. Сеть профилей геофизической съемки на площадке для
установки буровой платформы**

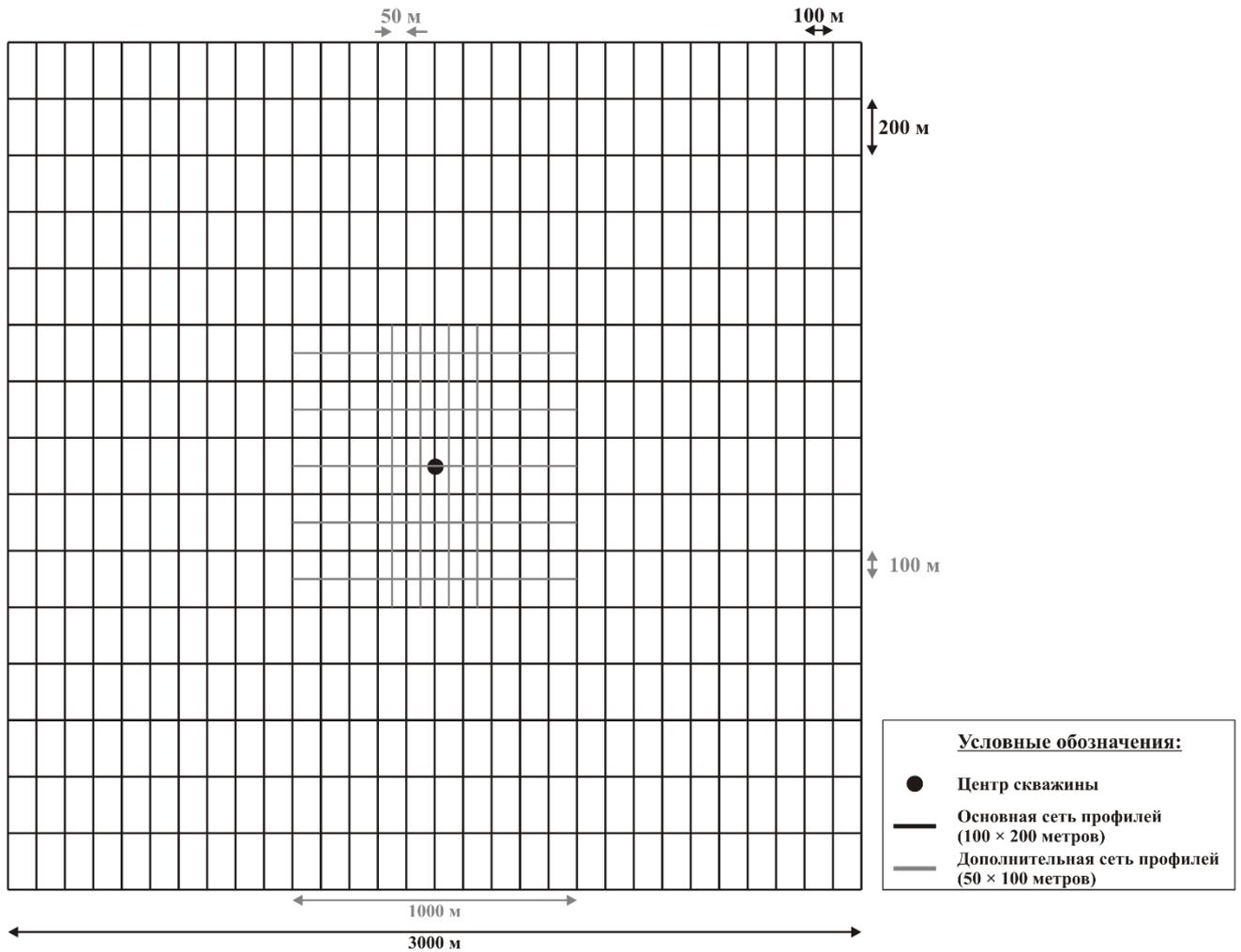


Рис А.1: Схема профилей геофизической съемки на площадке для установки буровой платформы

Приложение Б. Сравнение ширины покрытия методик трехмерных сейсмоакустических наблюдений

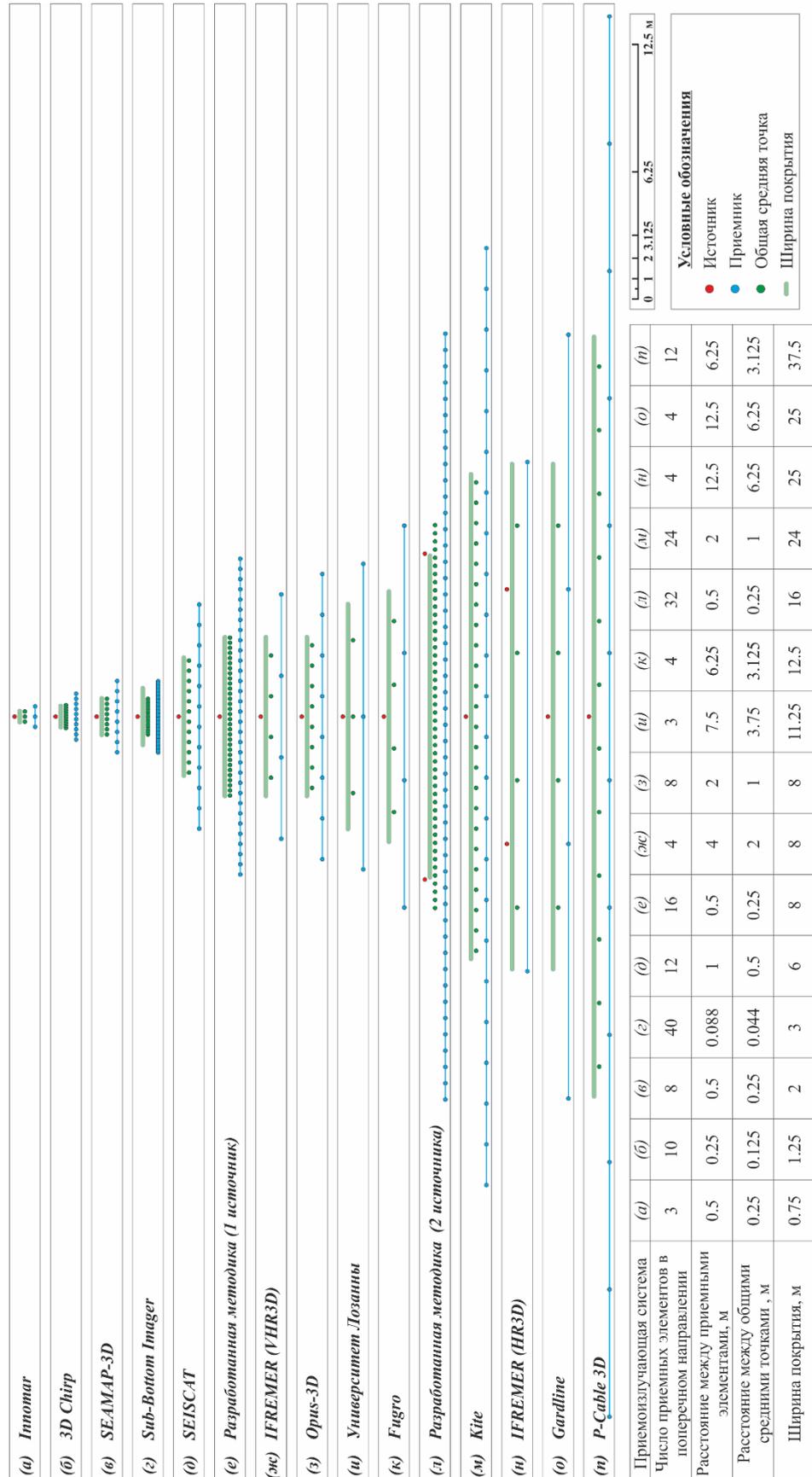


Рис Б.1: Сравнение ширины покрытия методик трехмерных сейсмоакустических наблюдений

Приложение В. Текст программы для расчета параметров разработанной методики трехмерных сейсмоакустических наблюдений

```

% Программа для системы математических вычислений Octave/MATLAB предназначена для расчета
% параметров методики трехмерных сейсмоакустических наблюдений.
%
% Размерности физических величин: расстояния и размеры [м], скорость судна [узлы], скорость упругих
% колебаний [км/с], углы [градусы], время [мс], суточная производительность [км2]
% Ось X направлена по направлению движения судна, ось Y направлена на левый борт судна
% Нумерация сейсмических каналов – 1 канал расположен у оголовья косы по левому борту

% Входные параметры
Nrec_str = 16; % Число приемников в косе
dL = 2; % Расстояние между каналами
dStr = 16; % Расстояние между точками буксировки
LeadIn = 1; % Расстояние от точки буксировки до центра первого канала
Nsou = 1; % Число источников (1 или 2)
dSou = 16; % Расстояние от источника до начала координат
Speed = 3.5; % Скорость движения судна
SPI = 0.4; % Расстояние между пунктами возбуждения
DepthMin = 15; % Минимальная глубина воды в районе исследований
dT = 3; % Длина импульса прямой волны
Vwater = 1.5; % Скорость упругих колебаний в воде
MutePercent = 0.3; % Допустимое растяжение сигнала [0..1]
Hours = 20; % Число рабочих часов в сутках
Bin = [0.5 0.5]; % Размер бина
LineSpacingCoef = 0.5; % Коэффициент для уменьшения межпрофильного расстояния [0..1]

% Вычисление вспомогательных параметров
StreamerLength = LeadIn + (Nrec_str-1)*dL + dL/2; % Расстояние от точки буксировки до точки
% соединения двух кос
dStr = dStr/2; % Расстояние от начала координат до точки буксировки
MaxX = (StreamerLength^2 - dStr^2)^0.5; % Расстояние до точки соединения кос
alpha = asin(dStr/StreamerLength)*180/pi; % Угол атаки косы
dX = dL*sin(alpha*pi/180); % Расстояние между приемниками в поперечном направлении
Swath = dX*Nrec_str*Nsou; % Ширина покрытия
LineSpacing = Swath * LineSpacingCoef; % Межпрофильное расстояние
PR = 1.852*Speed*Swath*Hours*LineSpacingCoef / 1000; % Суточная производительность

% Расчет положения источников и приемников
if (Nsou == 1) souX = -dSou; souY = 0; end
if (Nsou == 2) souX = [-dSou -dSou]; souY = [Nrec_str*dX -Nrec_str*dX]; end
Nrec = Nrec_str*2; % Определение общего числа приемников
for ii = 1:Nrec_str
    recX(Nrec_str+1-ii) = -MaxX+dL*ii*cos(alpha*pi/180)-0.5*dL*cos(alpha*pi/180);
    recY(Nrec_str+1-ii) = dL*ii*sin(alpha*pi/180)-0.5*dL*sin(alpha*pi/180);
    recX(ii+Nrec_str) = -MaxX+dL*ii*cos(alpha*pi/180)-0.5*dL*cos(alpha*pi/180);
    recY(ii+Nrec_str) = -dL*ii*sin(alpha*pi/180) + 0.5*dL*sin(alpha*pi/180);
end

% Расчет данных для анализа характеристик приемоизлучающего массива
for ii = 1:Nrec
    offset(ii) = ((recX(ii)-souX(1))^2+(recY(ii)-souY(1))^2)^0.5; % Расчет удаления
    angle(ii) = atan(0.5*offset(ii)/DepthMin)*180/pi; % Расчет угла подхода отраженной волны
    Tdirect(ii) = offset(ii)/Vwater; % Расчет времени регистрации прямой волны

```

```

Tnmo(ii) = ((2*DepthMin/ Vwater)^2+offset(ii)^2/Vwater^2)^0.5; % Расчет времени регистрации
отраженной волны
Tmute(ii) = offset(ii)/(Vwater*(2*MutePercent+MutePercent^2).^0.5); % Расчет линии мьютинга
end

% Визуализация геометрии расстановки
hFig = figure(1);
set(gcf,'PaperUnits','centimeters','PaperPosition',[0 0 21 29.7]);
for jj = 1:Nsou
    subplot(5,4,[jj*2-1 jj*2])
    hold on
    for ii = 1:Nrec
        cdpX((jj-1)*Nrec+ii) = (recX(ii)+souX(jj))/2; % Расчет координат общих средних точек
        cdpY((jj-1)*Nrec+ii) = (recY(ii)+souY(jj))/2; % Расчет координат общих средних точек
        line([souX(jj) recX(ii)], [souY(jj) recY(ii)], 'Marker', '.', 'MarkerSize', 4, 'LineStyle', '-', 'Color', 'cyan');
    end
    p1=plot(cdpX((jj-1)*Nrec+1:(jj)*Nrec), cdpY((jj-1)*Nrec+1:(jj)*Nrec), 'xb', 'MarkerSize', 4);
    p2=plot(recX, recY, 'og', 'MarkerSize', 4);
    p3=plot(souX(jj), souY(jj), '*r', 'MarkerSize', 4);
    p4=plot(0, -dStr, 'om', 'MarkerSize', 4); plot(0, dStr, 'om', 'MarkerSize', 4);
    axis equal; grid on; grid minor;
    xlim([-MaxX-35 2]);
    title(['Общие средние точки (источник ', num2str(jj), ')'])
end
hleg=legend([p1,p2,p3,p4], 'Общие средние точки', 'Приемники', 'Источники', 'Точки
буксировки', 'Location', 'West');
set(hleg, 'FontSize', 5);

% Визуализация двух последовательных пунктов возбуждения
subplot(5,4,[5 6 7 8])
hold on
axis equal; grid on; grid minor;
for jj = 1:2
    for ii = 1:Nrec
        if (jj == 2 && Nsou == 1) souX(jj)=souX(1); souY(jj)=souY(1); end
        cdptX((jj-1)*Nrec+ii) = (recX(ii)+souX(jj))/2+SPI*(jj-1);
        cdptY((jj-1)*Nrec+ii) = (recY(ii)+souY(jj))/2;
        if (jj == 1) line([souX(jj)+SPI*(jj-1) recX(ii)+SPI*(jj-1)], [souY(jj)
recY(ii)], 'Marker', '.', 'MarkerSize', 4, 'LineStyle', '-', 'Color', 'cyan');
        else line([souX(jj)+SPI*(jj-1) recX(ii)+SPI*(jj-1)], [souY(jj)
recY(ii)], 'Marker', '.', 'MarkerSize', 4, 'LineStyle', '-', 'Color', 'magenta'); end
    end
    if (jj == 1) plot(cdptX((jj-1)*Nrec+1:(jj)*Nrec), cdpy((jj-1)*Nrec+1:(jj)*Nrec), 'xb', 'MarkerSize', 4);
    else plot(cdptX((jj-1)*Nrec+1:(jj)*Nrec), cdptY((jj-1)*Nrec+1:(jj)*Nrec), 'xr', 'MarkerSize', 4); end
    plot(recX+SPI*(jj-1), recY, 'g', 'MarkerSize', 4);
    plot(souX(jj)+SPI*(jj-1), souY(jj), '*r', 'MarkerSize', 4);
    title('Общие средние точки для двух последовательных пунктов возбуждения');
end

% Визуализация углов подхода отраженных волн
subplot(5,4,[9 10])
plot(1:Nrec, angle, 'LineWidth', 1.25, 'Color', 'blue');
xlim([1 Nrec]); ylim([0 max(angle)+2]);
grid on; grid minor;
title('Углы подхода отраженных волн');
xlabel('Порядковый номер канала', 'FontSize', 8);
ylabel('Угол подхода, градусы', 'FontSize', 8);

```

```

% Визуализация годографов прямой и отраженной волн, линии мьютинга
subplot(5,4,[11 12])
hold on
p1=plot(1:Nrec,Tnmo,'LineWidth',1.25,'Color','blue');
p2=plot(1:Nrec,Tdirect,'LineWidth',1.25,'Color','red');
p3=plot(1:Nrec,Tdirect+dT,'LineWidth',1.25,'Color',[1,0.5,0]);
errorbar(1:Nrec,Tdirect+dT/2,ones(1,Nrec)*dT/2,'LineStyle','none','Color',[1,0.5,0]);
p4=plot(1:Nrec,Tmute,'LineWidth',1.25,'Color','green');
set(gca,'Ydir','reverse');
hleg=legend([p1,p2,p3,p4],Годограф отраженной волны',Годограф прямой волны',Импульс прямой
волны',ГЛиния мьютинга ' num2str(MutePercent*100) '%',Location','South');
set(hleg,'FontSize',7);
xlim([1 Nrec]); ylim([0 max(max([Tnmo Tmute Tdirect]))+16]);
title('Анализ интерференции прямой и отраженной волн')
xlabel('Порядковый номер канала','FontSize',8)
ylabel('Время, мс','FontSize',8)
grid on; grid minor;

% Задание "идеальной" сети профилей
In = 7; % Число профилей
Xn = 600; % Число пунктов возбуждения
route=zeros(Xn+(In-1)*Xn,2);
kk=1;
for ii = 1:In
    for jj = 1:Xn
        ind=jj+(ii-1)*Xn;
        if (mod(ii,2)==1)
            route(ind,1)=(jj-1)*SPI+dSou;
            route(ind,2)=(ii-1)*LineSpacing;
            dir = 1;
        else
            route(ind,1)=Xn * SPI - (jj)*SPI-dSou;
            route(ind,2)=(ii-1)*LineSpacing;
            dir = -1;
        end
    end
    for chan = 1:Nrec_str
        if (Nsou == 1)
            cdp(kk,1)=route(ind,1)+dir*cdpX(chan);
            cdp(kk,2)=route(ind,2)+dir*cdpY(chan);
            kk=kk+1;
            cdp(kk,1)=route(ind,1)+dir*cdpX(chan+Nrec_str);
            cdp(kk,2)=route(ind,2)+dir*cdpY(chan+Nrec_str);
            kk=kk+1;
        else
            cdp(kk,1)=route(ind,1)+dir*cdpX(chan+2*Nrec_str*mod(jj,2));
            cdp(kk,2)=route(ind,2)+dir*cdpY(chan+2*Nrec_str*mod(jj,2));
            kk=kk+1;
            cdp(kk,1)=route(ind,1)+dir*cdpX(chan+Nrec_str+2*Nrec_str*mod(jj,2));
            cdp(kk,2)=route(ind,2)+dir*cdpY(chan+Nrec_str+2*Nrec_str*mod(jj,2));
            kk=kk+1;
        end
    end
end
end
end

% Бинирование и расчет кратности
dXb = Bin(1); dYb = Bin(2);

```

```

X0 = floor(min(cdp(:,1)) - dXb / 2);   Y0 = floor(min(cdp(:,2)) - dYb / 2);
nX = ceil((max(cdp(:,1)) - min(cdp(:,1)) + dXb) / dXb) + 2;
nY = ceil((max(cdp(:,2)) - min(cdp(:,2)) + dYb) / dYb) + 2;
fold = zeros(nX, nY);
for ii = 1:size(cdp, 1)
    IL = floor((cdp(ii,1) - X0) / dXb) + 1;
    XL = floor((cdp(ii,2) - Y0) / dYb) + 1;
    fold(IL,XL)=fold(IL,XL)+1;
end
kk = 1;
for ii = 1:size(fold,1)
    for jj = 1:size(fold,2)
        if (100 <= ii && ii <= 400 && 20*Nsou <= jj && jj <= 50*Nsou) h_fold(kk)=fold(ii,jj); kk=kk+1; end
    end
end

% Визуализация карты кратности
subplot(5,4,[13 14 15]);
pcolor(fold');
cm=colormap(jet(max(max(fold))+1));
cm(1,1:3)=[1 1 1];
colormap(cm);
colorbar
hcb=colorbar('YTick',0:2:size(cm,1));
set(hcb,'YTickMode','manual')
axis equal;
shading flat; grid on;
title('Карта распределения кратности')

% Визуализация гистограммы распределения кратности
s16=subplot(5,4,16);
m=0:1:max(max(h_fold)+1);
n=hist(h_fold,m);
bar(m,n/size(h_fold,2)*100,'b');
xlim([-1 max(m)+1])
title({' ','Распределение кратности','(в полнократной зоне)'})

% Вывод входных и рассчитанных параметров
s1=subplot(5,4,[17 18]);
hold on
text(0,1,'Входные параметры:', 'FontWeight', 'bold');
text(0,0.9,{'Число приемников в косе: ' num2str(Nrec_str),['Расстояние между каналами (м): '
num2str(dL)],['Расстояние между точками буксировки (м): ' num2str(dStr*2)],['Расстояние до центра
первого канала (м): ',num2str(LeadIn)],['Число источников: ' num2str(Nsou)],['Удаление источника (м): '
num2str(dSou)],['Скорость судна (узлы): ' num2str(Speed)],['Расстояние между пунктами возбуждения (м): '
num2str(SPI)],['Размер бина (м): ' num2str(Bin(1)) ' x ' num2str(Bin(2))],['Минимальная глубина воды (м): '
num2str(DepthMin)]}, 'VerticalAlignment', 'top');
set(s1, 'Visible', 'Off');
s2=subplot(5,4,[19 20]);
hold on
text(0,1,'Рассчитанные параметры:', 'FontWeight', 'bold');
text(0,0.9,{'Угол атаки косы (градусы): ' num2str(alpha, '% 10.1f')},['Расстояние между приемниками ],['в
поперечном направлении (м): ' num2str(dX, '% 10.2f')],['Ширина покрытия (м): ' num2str(Swath, '%
10.2f')],['Межпрофильное расстояние (м): ' num2str(LineSpacing, '% 10.2f')],['Суточная
производительность (км{it}^2): ' num2str(PR, '% 10.2f')]}, 'VerticalAlignment', 'top');
set(s2, 'Visible', 'Off');
print(hFig, '-r600', '-dpng', 'filename.png')

```

Приложение Г. Сводная таблица профилей сейсмоакустической съемки в губе Ругозерская

Таблица Г.1: Сводная таблица профилей трехмерной сейсмоакустической съемки (08.07.2014)

Название профиля	Номер профиля (фактический)	Направление съемки	Время (UTC+0)		Плановые координаты профиля UTM 36N, WGS84			
			Начало	Конец	X (начало)	Y (начало)	X (конец)	Y (конец)
A1	2	→	09:53:00	10:03:37	496660.04	7384855.11	495917.09	7384955.53
B1	5	←	10:46:05	10:56:00	496659.64	7384851.92	495916.68	7384952.74
C1	8	→	11:38:00	11:46:08	496659.23	7384849.12	495916.28	7384949.94
D1	11	←	12:37:00	12:46:30	496658.83	7384845.93	495915.87	7384946.75
E1	13	←	13:11:30	13:21:00	496658.43	7384843.13	495915.47	7384943.96
F1	15	←	13:47:40	13:57:30	496658.02	7384839.94	495915.07	7384940.76
G1	17	←	14:25:20	14:34:40	496657.62	7384837.15	495914.66	7384937.97
A2	4	→	10:26:30	10:37:02	495914.26	7384934.77	496657.22	7384833.95
B2	6	→	11:03:20	11:12:58	495913.85	7384931.98	496656.81	7384831.16
C2	9	←	11:54:33	12:04:20	495913.45	7384928.79	496656.41	7384827.96
D2	12	→	12:54:05	13:03:00	495913.04	7384925.99	496656.01	7384825.17
E2	14	→	13:29:50	13:39:20	495912.64	7384923.20	496655.60	7384821.97
F2	16	→	14:07:00	14:16:43	495912.24	7384920.00	496655.20	7384819.18
G2	18	→	14:42:50	14:52:50	495911.83	7384917.21	496654.80	7384815.99
A3	1	←	09:31:32	09:41:40	496654.39	7384813.19	495911.43	7384914.01
B3	7	←	11:21:11	11:30:50	496653.99	7384810.40	495911.02	7384910.82
C3	10	→	12:17:54	12:27:55	496653.59	7384807.20	495910.62	7384908.03
D3	22	→	16:07:08	16:16:17	496653.18	7384804.41	495910.22	7384904.83
E3	21	←	15:44:28	15:54:10	496652.78	7384801.21	495909.81	7384902.04
F3	20	→	15:25:48	15:35:30	496652.38	7384798.42	495909.41	7384899.24
G3	19	←	15:07:07	15:16:25	496651.97	7384795.22	495909.00	7384896.05
A4	3	←	10:10:58	10:20:00	495908.60	7384893.26	496651.57	7384792.03